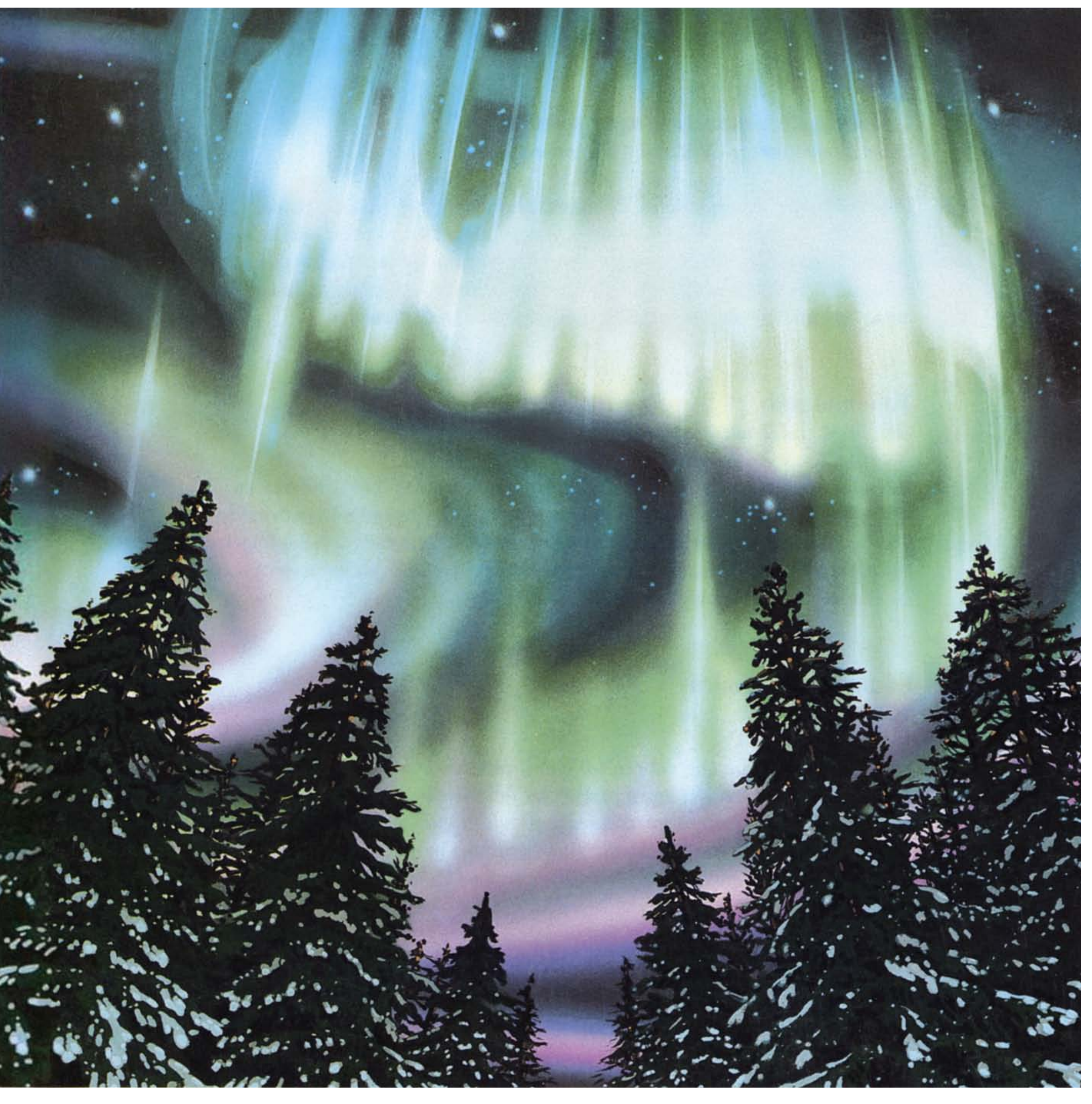
INVESTIGACION Y CIENCIA

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN



CORTINA DE LUZ AURORAL

Julio 1989

500 Ptas.

INVESTIGACION Y
CIENCIA
Julio de 1989 Número 154

Edición española de **SCIENTIFIC AMERICAN**

SECCIONES

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

Anna Avila: *Pasado y futuro de la Amazonía*; Amando García: *Creación de elementos superpesados*; Luis Bou: *Topobiología y Juegos de ordenador*; Inés Rodríguez Hidalgo: *La aurora dinámica*; Joandomènec Ros: *Ranas marsupiales*; Ana García: *Fibras ópticas en medicina*; Leonor Vernet: *Henry Norris Russell*; J. Vilardell: *Taller y laboratorio*.

Ciencia y sociedad:

Santiago Torres Martínez y Josep-Enric Llebot

Ciencia y empresa:

Manuel Puigcerver

Libros:

Emilio Elizalde, Luis Alonso, Pedro Sánchez Algarra y Alejandro Llano

PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Página	Fuente
9	M. Freeman, Bruce Coleman Inc.
10-11	George Retseck
12	Paul E. Berry, Jardín botánico de Missouri
13	Paul A. Colinvaux (*izquierda*), George Retseck (*derecha*)
14	Paul A. Colinvaux
17-22	Joe Lertola
25	George V. Kelvin
26	Gerald M. Edelman (*arriba*), George V. Kelvin (*abajo*)
27	Gerald M. Edelman
28	George V. Kelvin
29	Gerald M. Edelman
30-32	George V. Kelvin
43	Syun-Ichi Akasofu
44-49	Ian Worpole
55	M.ª Dolores Vázquez, Universidad Autónoma de Barcelona
56-59	Juan Barceló y Antonio Aragón
60	M.ª Dolores Vázquez
61	Juan Barceló y Antonio Aragón
62	M.ª Dolores Vázquez
65	Charles W. Myers, Museo Norteamericano de Historia Natural
66-72	Patricia J. Wynne
75-76	Thomas C. Moore
77	Yasumi Uchida, Universidad de Tokio
78	Thomas C. Moore (*arriba*), Warren S. Grundfest y Frank Litvack (*abajo*)
79	Daniel R. Doiron, Photo-Therapeutics, Inc.
83	W. F. Meggers Collection, Biblioteca Niels Bohr, Instituto Americano de Física
84	Andrew Christie
85	Observatorio de la Institución Carnegie de Washington (*izquierda*), Andrew Christie (*derecha*)
88	Owen Gingerich
92-95	Michael Goodman
97	Johny Johnson
98-99	A. K. Dewdney



LA PORTADA ilustra una aurora con rayos que cruza un limpio cielo nocturno de una región septentrional. (Véase "La aurora dinámica", por Syun-Ichi Akasofu, en este número). Las luces se emiten cuando el oxígeno y el nitrógeno de la baja ionosfera chocan con electrones que, provenientes del Sol, sufren la aceleración impulsada por el mecanismo generador de la magnetosfera terrestre. La forma laminada de las auroras débese a un campo eléctrico peculiar en la más alta ionosfera.

INVESTIGACION Y CIENCIA

DIRECTOR GENERAL Francisco Gracia Guillén
DIRECTOR EDITORIAL José María Valderas Gallardo
REDACCIÓN Purificación Mayoral Martínez
PRODUCCIÓN César Redondo Zayas
PROMOCIÓN EXTERIOR Pedro Clotas Cierco
EDITA Prensa Científica, S. A. Calabria, 235-239 - 08029 Barcelona (ESPAÑA)
Teléfono 322 05 51 Telefax 410 79 12

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR Jonathan Piel
BOARD OF EDITORS Armand Schwab, Jr., Managing Editor; Timothy Appenzeller, Associate Editor; Timothy M. Beardsley; John M. Benditt; Laurie Burnham; Elizabeth Corcoran; Ari W. Epstein; Gregory R. Greenwell; John Horgan; June Kinoshita; Philip Morrison, Book Editor; Tony Rothman; Ricki L. Rusting; Russell Ruthen, Karen Wright
PUBLISHER Harry Myers
ADVERTISING DIRECTOR Peter B. Kennedy
PRESIDENT AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER Claus-Gerhard Firchow
CHAIRMAN OF THE BOARD Georg-Dieter von Holtzbrinck
CHAIRMAN EMERITUS Gerard Piel

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Calabria, 235-239
08029 Barcelona (España)
Teléfono 322 05 51 ext. 33-37

Precios de suscripción, en pesetas:

	Un año	Dos años
España	5500	10.000
Extranjero	6200	11.500

Ejemplares sueltos:

Ordinario: 500 pesetas
Extraordinario: 650 pesetas

- Todos los precios indicados incluyen el IVA, cuando es aplicable.
- En Canarias, Ceuta y Melilla los precios incluyen el transporte aéreo.
- El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

DISTRIBUCION

para España:

MIDESA
Carretera de Irún, km. 13,350
(Variante de Fuencarral)
28049 Madrid Tel.652 42 00

para los restantes países:

Editorial Labor, S. A.
Calabria, 235-239 - 08029 Barcelona
Teléfono 322 05 51

PUBLICIDAD

Madrid: Gustavo Martínez Ovín
Menorca, 8, bajo, centro, izquierda.
28009 Madrid
Teléfonos 409 70 45 - 409 70 46

Cataluña:
Thaïs Muñoz Oliva
Muntaner, 467-469, 3º 3ª
08021 Barcelona
Teléfono 211 92 45



ISSN 0210-136X Dep. legal: B. 38.999-76

Fotocomposición: Tecfa. Línea Fotocomposición, S.A. Almogàvers, 189 - 08018 Barcelona

Fotocromos reproducidos por Tecfa, S. A. Almogàvers, 189 - 08018 Barcelona

Imprime Rotographik, S. A. Ctra. de Caldes, km 3,7 - Santa Perpetua de la Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España

Los espacios en gris
corresponden a publicidad
en la edición impresa

Hace...

José M.ª López Piñero

...cuatrocientos cincuenta años

El impresor Juan de Brocar publicó en Alcalá la sexta edición de *El libro de agricultura*, de Gabriel Alonso de Herrera, última "corregida y añadida" por su autor, que falleció en torno a la fecha de su aparición.

Los datos biográficos acerca de Herrera, máxima figura de la agronomía renacentista, son escasos y dispersos. Nació hacia 1480 en Talavera de la Reina, localidad en la que su familia poseía tierras. Desde su niñez se familiarizó con las cuestiones agrícolas, interesándose por ellas bajo la influencia de su padre, cuyos criterios y experiencia recogería más tarde en su obra. En 1492 se trasladó a Granada como protegido de fray Hernando de Talavera con quien, al parecer, estaba emparentado. En la ciudad recién conquistada por los Reyes Católicos cursó estudios eclesiásticos en el Colegio de San Cecilio, que su protector había fundado tras ser nombrado arzobispo. Al mismo tiempo completó su formación agronómica, conociendo directamente los métodos de los campesinos musulmanes de la vega granadina, distintos y en líneas generales más adelantados que los habituales en los campos castellanos, y leyendo los principales tratados sobre la materia de la Antigüedad clásica y de la Edad Media latina, así como algunos islámicos. Entre estos últimos destaca el de "Abencenif", nombre que Millás Vallicrosa demostró que corresponde al célebre autor toledano del siglo XI Ibn Wafid. Lo manejó seguramente a través de su traducción medieval castellana, a pesar de que en el Colegio de San Cecilio se enseñaba la lengua árabe con la finalidad de que los futuros clérigos fueran capaces de catequizar la población del antiguo reino nazarí.

Al final de su estancia en Granada, en 1502, Herrera tenía ya prestigio como experto en agricultura, lo que se refleja en el hecho de que fuera encargado de la administración de los huertos que el marqués de Mondéjar tenía en Granada. Durante la década siguiente viajó por Andalucía, Valencia, Aragón y Vizcaya, así como por diversos territorios italianos y franceses, con el fin de estudiar las prácticas agrícolas locales, posiblemente por encargo del cardenal Francisco Jiménez de Cisneros, a quien dedicó *El libro de agricultura* (1513). De su vida durante el cuarto de siglo comprendido entre esta fecha y su fallecimiento solamente se sabe con seguridad que introdujo adiciones y enmiendas en las cinco ediciones de su tratado publicadas hasta 1539, como hemos adelantado.

La obra de Herrera tuvo una excepcional pervivencia, ya que continuó reimprimiéndose después de su muerte a lo largo de los tres siglos siguientes, alcanzando un total de veintiocho ediciones en castellano hasta 1862. Por otra parte, se publicó en francés (1596) y seis veces en italiano entre 1557 y 1608. Ello se explica fundamentalmente porque ofrece una reelaboración de la agronomía clásica, medieval e islámica apoyada en la amplia experiencia personal que Herrera había reunido en Talavera, Granada y sus prolongados viajes de estudio. El autor más citado es el medieval Pietro Crescentino, seguido de los clásicos Plinio, Paladio, Columela, Teofrasto y Varrón, y de los islámicos Ibn Sina e Ibn Wafid. Millás Vallicrosa puso de relieve la influencia andalusí en numerosos detalles, pero Glick ha hecho notar que en el conjunto de la obra predominan las posiciones opuestas a la tradición musulmana: "Los andalusíes pensaron que la calidad del suelo era el elemento más importante en la agricultura; Herrera asigna al agua el primer lugar. Los musulmanes eran partidarios de una gran flexibilidad en el ajuste del número de surcos a la calidad del suelo; Herrera sigue la prescripción de Varrón de hacer solamente tres. Los andalusíes pensaron que los fertilizantes eran el medio principal para adaptar los suelos a la cualidad necesaria para recibir los cultivos... Herrera prefirió las cenizas al estiércol... y pensó que las exigencias de riego controlaban el uso del fertilizante".

No hace falta decir que la base teórica general de la agronomía de Herrera fue la doctrina clásica griega de los cuatro elementos y de la oposición o *enantiosis* de las cualidades cardinales. Sin embargo, al exponer cuestiones concretas concedió gran relieve a la experiencia sensorial. Por ejemplo, al ocuparse de las "señales para conocer la malicia y bondad de la tierra", afirmó: "Todos o los más que de agricultura escribieron... concuerdan en que la color no es testigo suficiente para haber entero y verdadero conocimiento della, por donde parece falso lo que comúnmente dicen: la tierra prieta lleva el pan; verdad es que por la mayor parte aquélla es la mejor, y por esso dan otros avisos para mejor la conocer. Pedro Crecentino, Columella, Paladio, Plinio dicen: buena tierra y propria para llevar pan, es que sea pegajosa, blanda, no arenisca, lo cual se prueba desta manera. Tomar un terrón pequeño y mojarle o con saliva o con agua y traerle entre los dedos, y si se pega y hace massa, es buena y gruessa, mas si está áspera y arenosa, no es tal. Esto se entienda en tierras que ni sean barrizales o arcillas, porque aunque aquéllas sean tierras gruesas y pegajosas, por su extrema dureza y sequedad, para llevar pan son inhábiles. Item es cierto ser buenas tierras las que están bien cubiertas de grama, onde naturalmente se crían yezgos, juncos, zarzales, trébol, viznagas, endrinos monteses, cigutas, y unas cañahejas que tienen la hoja como hinojo, cañas, cardos, malvas, quexigos, retamas grandes; y que todas las yerbas y plantas que en ellas nacieren, sean crecidas, verdes, alegres xugosas. Item es buena tierra la que presto embebe el agua y conserva el humor. Una de las principales señales para bien conocer la bondad de la tierra es que conserve mucho tiempo el humor que recibe, y tanto es mejor que otra cuanto más lo retuviere que otra, como dice Paladio. Así mesmo es buena experiencia hacer un hoyo de tal grandeza que parezca conveniente para plantar algún árbol, y dende a uno o dos días tornarle a henchir de la misma tierra, y si se hinche y sobra es tierra gruessa, y si se hinche y no sobra es tierra mediana, y si no se acaba de henchir es flaca y muy liviana. Item es buena tierra onde nascen aguas dulces de buen sabor, aunque sean aguas gruessas, pesadas y que presto se corrompen, que las aguas gruessas, por la mayor parte son naturales en tierras gruessas, porque comúnmente cada cosa responde a su principio y origen. Las aguas delgadas las más veces vienen de tierras delgadas y aun estériles, como son arenales y sierras pedrizas. El agua que cría cieno es señal que viene de tierra gruessa, porque el cieno es como grassa que sale de la tierra sustanciosa; con todo esso, el agua que nasce de tierras de yesso cría cieno, mas ni aún por

Libro primero.
Capitulo primero en que parte toda la obra.


A lavor de la tierra e arte de agricultura principal mente se parte en seys libros generales. ¶ El primero tratara mediana mente de las tierras buenas/ comunales/ y malas. y dara los documẽtos y señales segun las reglas de los agricultores para las conocer: y dezir que manera de pan pertenece y conviene a cada suerte de tierra: y de toda manera de pan y legumbres: y que tal a de ser la simiẽte: y del tiempo del arar/ sembrar/ arrejacar/ o escardar/ coger/ guardar/ y algunas propriedades dello. ¶ El segundo libro tratara de las viñas y de todas sus particularidades dellas. y de los parrales diziendo qual qualidad de viña mejor conviene a cada manera de tierra: y en que sitios son mejores las viñas. y de la forma y tiempo de plantar/ arar/ cavar/ enxerirlas: y del podar. y de como se a de hazer el vino: y de la bodega/ y de las propriedades del vino y del vinagre.
¶ El tercero libro sera de muchas diversidades de arboles y otras plantas de cada vna por si: monstrando en que qualidad de ayres y tierras la tal planta mejor se cria y poner el arte del plantar conveniente a cada vna. y del enxerir y poner secretos muy sotiles y agradables. y dezir de algunas yervas y sus propriedades.
¶ El quarto de las ortalizas y yervas. ¶ El quinto tratara de los ganados y aves de cada vna por si diziendo como se an de criar y de sus enfermedades y poner los remedios a ellas convenientes segun los agricultores y dezir algunas propriedades de algunos dellos. Esto hecho sera (con la gracia de dios) el fin de la obra.
¶ El sexto sera vna recapitulacion de toda la obra poniendo que cosas se han de hazer cada mes: y otras cosas necessarias a este exercicio.

¶ Capitulo. ij. del sitio y qualidad de las tierras y preceptos para las conocer.

Detalle de la página inicial de la primera edición (1513) de El libro de agricultura, *de Gabriel Alonso de Herrera, publicada en Alcalá por el célebre impresor Arnao Guillén de Brocar.*

esso arguye ser buena la tal tierra de onde nasce. Item es buena la tierra que es dulce, lo cual se prueba tomando un terrón della y desatándole y desliéndole en un vaso de agua dulce y de buen sabor, y colándolo y gustándolo después de assentado; cual fuere el sabor de aquella agua, tal es el de la tierra que en ella se deshizo, y esto pertenece más para las viñas que para otra cosa. Item es buena tierra la que en lloviendo se para blanda, muelle y fofa; es mala la que se para dura. Xarales, coscojales, rebollares, son muestras de tierra de mediana manera; los encinales suelen, por la mayor parte, en tierras areniscas nascer; onde nasce el romero y berezo suelen ser tierras las más veces muy livianas y aún del todo para pan estériles. Malos terrenos desnudos de sustancia del todo sin provecho son éstos, arenales floxos, tierras desnudas y peladas de yerba, y si alguna tienen, es mala, dessequida, arrugada como roñosa, sin xugo y sin sustancia alguna. Item atochales o espartizales, y las tierras que con lluvia se paran duras, tiestas, y las que son muy secas, muy salobres, muy amargas, de onde nascen aguas muy saladas, y estas tales no tienen remedio para corregir y emendarse, y si alguno tienen es tan difícil, que ante sería cierta la pérdida que la ganancia".

El libro de agricultura está dividido en seis partes que, tras las cuestiones generales, tratan del cultivo de cereales de secano, los viñedos, los árboles, las hortalizas, los animales domésticos y las tareas que corresponden a cada mes. En algunos capítulos se refleja la mentalidad renacentista de Herrera ante la técnica como clave de la superioridad de lo "nuevo" frente a lo "antiguo" y como medio de "igualarnos con la natura" e incluso "emendarla". Veamos, como muestra, la introducción del dedicado a los injertos: "Esto del enxerir es una obra tan singular y necessaria cuan sotil y graciosa y en toda el agricultura a mi ver no hay exercicio en que más cualquier noble persona pueda emplear su tiempo porque con ésta más que con ninguna otra obra los árboles monteses se hacen caseros, los estériles fructíferos; los buenos mucho mejores. Esto causa haber cada día nuevas maneras de fruta que ni las hobo antiguamente, ni fueron criadas en principio del mundo. En tanto que casi pocos menos árboles hay inventados que naturales; que como de dos maneras o especies de animales se engendra otra tercera que es muy diferente ansí como son las mulas. Ansí tales árboles se pueden enxerir en otros que hagan lo mismo; y esto es muy continuo en los árboles que son muy desemejantes; y los enxeren passando los unos por otros; y desta manera se hacen los melocotones passando los duraznos por los membrillos. Cualquier otro árbol que tenga cuesco lo de fuera será lo que era antes, o durazno o ciruela, y la pepita será almendra; y esta es la más singular manera de enxertos, donde en una fruta están enteramente dos frutas. Es cosa maravillosa el enxerir que parece que con ello contendemos en igualarnos con la natura; y aún la emendamos muchas veces que lo que ella hace malo con el enxerir se enmienda, y lo bueno mejora, y es tanta la mudanza que el enxerto hace que si no hay otro árbol de que tomar puas tomando las puas del mismo, y cortándolas por baxo y enxeriéndolo en él da muy mejor fruto que antes; como dice Plinio del castaño que él llamó coreliano, porque un caballero que se llamaba Corelio lo enxirió; y el Crescentino dice que el tal árbol llevará la fruta muy diferente de la que llevaba primero no solamente en la grandeza y mejoría del sabor, más aún en la hechura, y él dice que de aquí vinieron tantas diferencias como hay en cada linaje de frutas, y mientras más baxo fuere el enxerto, mayor será la alteración y mudanza y si fuere en el suelo mucho mayor.

"Pues hacer de frutas tempranas tardías y de tardías tempranas ya es muy notorio a todos que todo enxerto, da la fruta al tiempo que la daba el tronco en que está enxerto, o es poca la distancia de antes o después.

"Más sotileza y admiración lleva aquella manera de enxerir con que toda fruta que tiene cuesco enxerta en cierto árbol no le tenga después; porque como Paladio y Pedro Crecentino enseñan para los duraznos y priscos, ansí se hará en los otros árboles como diremos más abaxo. De todas las maneras de enxerir es lo más seguro y prende mejor; crece más presto, da más fruta, vive más tiempo siendo de semejante en semejante; como de peral en toda manera de perales y cermeños, de manzanos en toda manera de manzanos, peros, camuesas, de duraznos en priscos, alberchingos. Bien que por la mayor parte todo árbol de pepita prende en todo árbol que lleva pepita en la fruta como perales en membrillos, y en manzanos, y por el contrario y el de cuesco en cuesco como el durazno en almendro, el ciruelo en almendro o duraznos y aun según Columela, todo árbol que es de corteza semejante gruessa como los que son para escudete prenden unos en otros aunque sean de contrarias naturas. E aun los que a un tiempo brotan sean de escudete o no".

Pasado y futuro de la Amazonía

La historia climática de la selva amazónica nos habla de un ecosistema bien adaptado a ciertas perturbaciones naturales. Pero, ¿podrá resistir la explotación humana?

Paul A. Colinvaux

La pluviselva que cubre la gran cuenca del río Amazonas se extiende, vista desde el aire, como una alfombra verde, uniforme y recortada aquí y allá por cursos fluviales. La verdad es que la selva es todo menos uniforme. La "alfombra" es la bóveda o dosel del bosque, formado por las hojas planifolias de muchos tipos de árboles gigantes, bóveda que constituye la parte superior de un ecosistema especial: el ecosistema con más especies del mundo. La pluviselva alberga unas 80.000 especies vegetales (de las cuales 600 son palmeras) y posiblemente unos 30 millones de especies animales, insectos en su mayoría.

Hasta hace poco, creíase que semejante diversidad debíase a su clima imperecedero, estable, caluroso y con lluvia abundante. A salvo de la pequeña catástrofe que supone la estación invernal y del gran desastre inmenso de las glaciaciones, seguíase postulando, el dominio tropical, conocido por "Amazonía", perdería pocas especies y, en cambio, podría acumular muchas. Pero los trabajos de campo dan a entender otra cosa: la Amazonía ha padecido cambios climáticos de todas las escalas temporales, incluido el enfriamiento a raíz de la extensión de los glaciares septentrionales en la edad del hielo. Por otro lado, las moderadas perturbaciones climáticas en la región, lejos de dañar la biología amazónica, podrían ayudar a explicar la espléndida diversidad de la pluviselva.

PAUL A. COLINVAUX, autor de varios libros de ecología, ha sido profesor de zoología y antropología desde 1972. Cursó la carrera en la Universidad de Cambridge de su Inglaterra natal, antes de partir a los Estados Unidos, para doctorarse en zoología por la Universidad de Duke; en 1964 se trasladó a Ohio. Cuando su trabajo se lo permite, le gusta acompañar a su esposa, bióloga especialista en arrecifes coralinos, en sus expediciones submarinas.

La influencia de climas pretéritos sobre la diversidad de especies del ecosistema amazónico ofrece un interés que trasciende el marco puramente académico; constituye una herramienta poderosa para predecir la capacidad del bosque de absorber cambios. Conforme el hombre va devastando extensas áreas forestadas, se va extinguiendo un incalculable número de especies, en un proceso sin precedentes en la historia. Los países con jurisdicción sobre la pluviselva (sobre todo Brasil, Venezuela, Colombia, Ecuador y Perú) tendrían que diseñar estrategias de gestión que permitieran salvar todas las especies posibles y que, al mismo tiempo, fueran compatibles con su demanda de desarrollo económico. Los que han de programar estas estrategias deben conocer los factores que afectan a la diversidad de especies. De ahí la importancia de descubrir qué tipo de agresiones ha tolerado el ecosistema a lo largo de su historia.

La vieja creencia de que la diversidad de especies en la cuenca amazónica se explicaba por su estabilidad climática surgió, aunque parezca extraño, de observaciones de las profundidades oceánicas. Howard L. Sanders, del Laboratorio Biológico Marino de Woods Hole, descubrió la extraordinaria diversidad de animales que habitaban en el barro del fondo marino a pesar de la oscuridad, el frío y la baja productividad biológica allí reinantes. H. L. Sanders consideró que dichas condiciones de vida adversas quedaban contrarrestadas con la perpetua uniformidad del medio. Y razonó: si no se registran grandes fluctuaciones en las condiciones físicas, la extinción de las especies adaptadas a las condiciones imperantes ha de ser rara. A lo largo del tiempo nuevas especies continuarán evolucionando; así, la tasa de especiación será mayor que la de extinción y, en consecuencia, aumentará la diversidad.

Sanders sugirió que podía establecerse una analogía entre la pluviselva amazónica y otros bosques tropicales (más productivos), por un lado, y las profundidades marinas, por otro; lugares con un suministro anual estable de humedad y calor, en ellos el fenómeno de la extinción de especies sería infrecuente. La ausencia de inviernos y glaciaciones, sumada al hecho de que las especies de árboles que forman la pluviselva han persistido, como mínimo, a lo largo de 30 millones de años en este territorio de 3000 kilómetros de ancho por 1000 km de largo, confirman este punto de vista.

Llegamos así al año 1969, cuando observaciones de distinto signo sembraron dudas sobre la validez de la teoría de la estabilidad aplicada al Amazonas. Presuponían que el clima había fluctuado allí bastante en tiempos pasados. Jürgen Haffer, por entonces en la Mobil Research and Development Corporation, observó que los extremos antagónicos de la cuenca alojaban faunas ornitológicas exclusivas, a pesar de que el bosque se extendía sin solución de continuidad desde el borde occidental del Amazonas hasta la costa atlántica por el este. Haffer y otros biólogos vieron también disyunciones entre especies de mariposas y algunos grupos más de animales. Esta distribución planteaba un atractivo interrogante a los científicos que investigan la distribución de especies: ¿por qué han quedado aisladas las poblaciones, si el hábitat en que se encuentran es continuo?

Haffer propuso una explicación tan lógica y atrevida que a muchos nos hubiera gustado haberla concebido antes. Sugirió que el aislamiento moderno tiene sus raíces en el pasado, en la última glaciación. Al observar que las regiones de aislamiento de especies suelen encontrarse en montículos, y que las hondonadas son más secas que los cerros, dedujo que, durante las glaciaciones, los valles amazónicos se convirtie-

ron en una llanura semidesértica. Mientras, las regiones más elevadas se transformaron en islas húmedas que sirvieron de refugio a la flora y fauna del bosque tropical. Las poblaciones antaño continuas divergieron a lo largo de ese gradiente ecológico y se separaron de manera permanente conforme se fueron adaptando a sus hábitats montaraces.

Se trata de una hipótesis muy sugestiva. No sólo explica la disyunción de especies, sino que ayuda también a entender la insólita diversidad que existe en la cuenca amazónica. Los refugios de las épocas glaciales protegerían de la extinción a las especies existentes, por el mismo procedimiento que se predijo en la hipótesis de la estabilidad, pero el periódico aislamiento geográfico de poblaciones relacionadas (se han estimado 13 períodos de glaciación hasta hoy) propiciaría una ininterrumpida y creciente divergencia.

Para validar la hipótesis del refugio, se han de encontrar pruebas de que los valles del Amazonas, cubiertos hoy por un bosque húmedo, se secaron en tiempos de las glaciaciones. Hasta ahora nadie ha demostrado que el Amazonas fuera árido, aunque existen algunos indicios aportados por modelos de ordenador y por muestras de sedimentos extraídos de varios lugares de los trópicos.

A título de ejemplo, John E. Kutzbach y Peter J. Guetter, de la Universidad de Wisconsin en Madison, que han experimentado con modelos de ordenador sobre el clima mundial durante las glaciaciones, infieren que hubo una reducción del 20 por ciento de las lluvias monzónicas tropicales. Semejante disminución provocaría que se extendiera la aridez en las regiones estacionales —las que presentan verdaderos períodos secos cada año— incluyendo, al menos en parte, al Amazonas. (Muchas de las llamadas regiones estacionales en los trópicos carecen de



1. VISTA DE LA PLUVISELVA recortada por el agua. Aunque parece superficialmente uniforme, en ella medran múltiples especies forestales que crecen juntas. Ese húmedo y cálido ecosistema contiene más especies de plantas y animales por unidad de superficie (y también en total) que cualquier otro lugar del planeta. Tamaña diversidad se atribuyó, en principio, a la existencia de un clima estable, pero hoy se cree que la Amazonía ha sufrido desde siempre tormentas eléctricas de índole local, desbordamientos y otras agresiones. Contrariamente a lo que ocurre con el avance glacial en un continente, estas perturbaciones moderadas impiden la extinción. Al eliminar algunos individuos de las especies dominantes brindan una oportunidad para que arraiguen las más débiles.

verdaderos períodos secos anuales: se trata, sencillamente, de períodos menos lluviosos que en otras estaciones.)

Le debemos a Daniel A. Livingstone, de la Universidad de Duke, algunos de los primeros datos de campo concernientes a la cuestión de la aridez. A través del examen de polen fósil arbóreo (un buen indicador de la flora local), descubrió que varias pluviselvas tropicales de Africa actual crecen donde hace 12.000 o 20.000 años había una sabana o un bosque seco: esto es, a finales de la última glaciación, entre 70.000 y 10.000 años atrás. En la periferia de la cuenca amazónica se han encontrado también indicios de una aridez similar en épocas de glaciación, lo que sugiere que lo que es cierto para Africa también podría serlo para la Amazonía.

Yo mismo recogí datos que denunciaban la aridez amazónica en las islas Galápagos, a unos 2000 kilómetros al oeste del extremo occidental de la Amazonía ecuatoriana. Una muestra cabalmente fechada del sedimento de un lago de agua dulce de las Galápagos señala que el lago se secó durante la última glaciación y no se volvió a llenar hasta principios del Holoceno, el período posglacial en que vivimos.

En el propio continente, otros investigadores han encontrado pruebas parecidas al norte del Amazonas. En la Venezuela septentrional, el profundo lago Valencia de la actualidad estuvo seco al final de la última glaciación, y lo que ahora es una ciénaga en la costa de Guayana estaba cubierto por vegetación xerofítica. De acuerdo con otra línea de investigación, los bosques estacionales del sur de la cuenca, cerca de São Paulo, eran también zonas áridas.

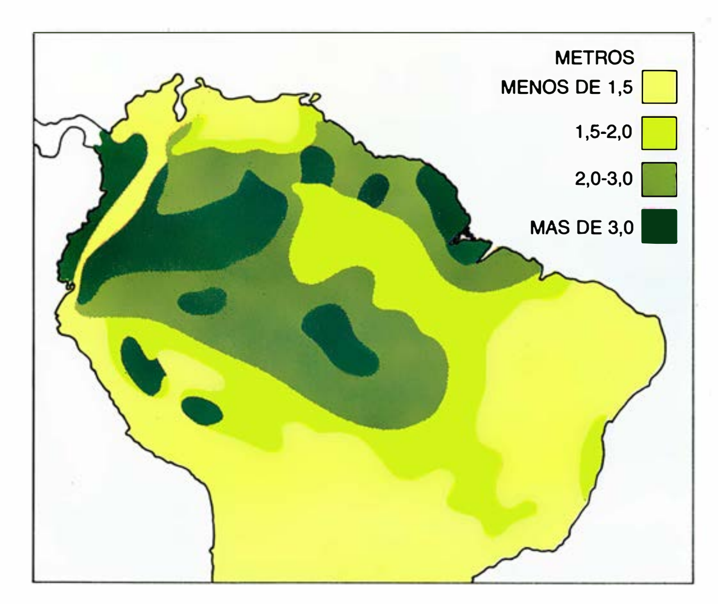
Los sondeos de las profundidades marinas frente a la desembocadura del río Amazonas, en el océano Atlántico, han aportado más pruebas de la aridez de los valles amazónicos en los períodos glaciales. John E. Damuth y Rhodes W. Fairbridge, por entonces en la Universidad de Columbia, encontraron que los sedimentos depositados por la corriente este del río durante la última glaciación incluían una pequeña proporción de feldespatos, minerales procedentes de rocas cristalinas, productos verosímiles de la erosión de un paisaje desértico.

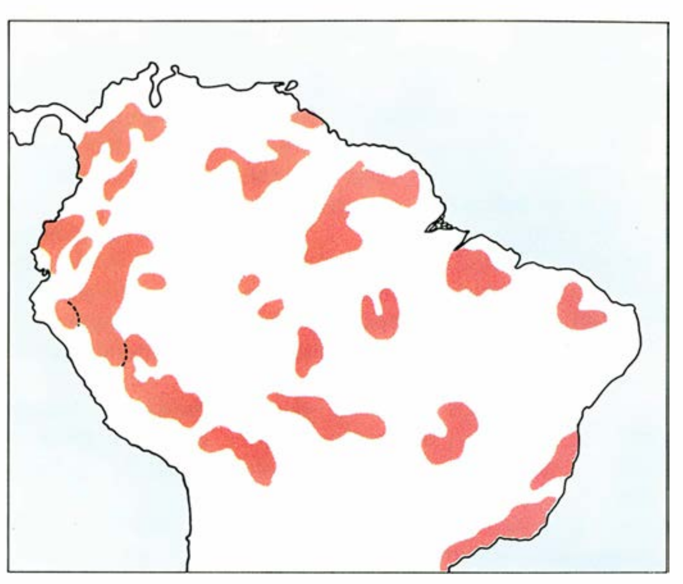
A pesar del cúmulo de pruebas circunstanciales que apuntan hacia la existencia de aridez en los períodos glaciales, me he ido convenciendo de que no alcanzan la suficiente solidez. Para Georg Irion, del Instituto de Investigación y Museo de Historia Natural de Frankfurt, los feldespatos de los depósitos atlánticos podrían proceder de rocas de la cuenca amazónica, pero no de rocas superficiales. Al descender el nivel del mar durante las glaciaciones, los tributarios del Amazonas habrían excavado sus canales en profundidad, erosionando los feldespatos en el transcurso del proceso.

Los datos de sedimentos de las Galápagos y de puntos del continente en torno a la cuenca tampoco son convincentes, porque las regiones de las que se obtuvieron los sedimentos, aunque



2. CUENCA FLUVIAL AMAZONICA, que limita al este con el océano Atlántico, al norte con las cordilleras de Venezuela y Guayana, al oeste con los Andes (que alcanzan hasta 6000 metros), y al sur con el Mato Grosso. La pluviselva que cubre la cuenca (*en verde oscuro*) se eleva hasta unos 1200 metros.





3. PRECIPITACION MEDIA ANUAL en la Amazonía (*izquierda*) y distribución de distintas especies de mariposas (*derecha*). Estos mapas muestran que las regiones de aislamiento de especies suelen coincidir con las partes más húmedas de la cuenca; aunque también se centran sobre colinas. Un patrón similar, observado inicialmente entre las aves, originó la hipótesis según la cual los núcleos aislados se establecieron hace mucho, quizás durante la última glaciación (desde hace 70.000 hasta hace 10.000 años). La teoría presupone que los valles se tornaron áridos durante las glaciaciones y que las colinas, más húmedas, se convirtieron en refugios para las especies de la selva; las especies evolucionarían entonces aisladamente y persistirían solitarias al regenerase la selva. Datos recientes sugieren que los supuestos refugios glaciales eran demasiado fríos para poder mantener el bosque tropical; en cambio, éste persistió en alguna parte de los valles, más cálidos, aunque sin llegar a la aridez. El autor rechaza la teoría del refugio, si bien acepta la noción de que el clima fluctúa de manera apreciable.

más cercanas que Africa, distan bastante de la pluviselva amazónica. Además, estas regiones se hallan frecuentemente sujetas a la influencia de distintas tendencias climáticas. Entre los lugares estudiados y la cuenca amazónica se yerguen los Andes empinados, la región montañosa de Venezuela y Guayana y otra inmensa cordillera, el Mato Grosso (el gran matorral); constituyen, respectivamente, los límites occidental, septentrional y meridional de la cuenca. Cada frontera es lugar de tensión climática y, por ello, el clima suele diferir de una vertiente a otra.

Podría ocurrir muy bien que, en las regiones de la Amazonía actual sometidas a sucesión estacional —quizá debajo mismo de los altos de Guayana en el extremo noreste, el margen suroeste del Mato Grosso y en puntos de la depresión central del Brasil—, la reducción de las lluvias monzónicas en épocas glaciales provocara la semiaridez. Pero muchos autores reputan improbable que un 20 por ciento menos de lluvia repercuta en la vida de las regiones más húmedas de la cuenca, con una precipitación anual de 2000 a 5000 milímetros.

En 1985, la ausencia comprobada de fósiles de los períodos glaciales datados con carbono 14 (^{14}C), procedentes de los refugios postulados por Haffer o de los valles amazónicos, nos indujo, a mí y a mis colaboradores de la Universidad estatal de Ohio, a buscar datos en el propio Amazonas y encontramos los únicos fósiles fechados hasta ahora de una época glacial. De acuerdo con los mismos, la cuenca no se secó. Pero sí sufrió un cambio significativo, enfriándose varios grados centígrados.

Topamos con nuestros especímenes por casualidad, buscando lagos antiguos en cuyos sedimentos esperábamos descubrir registros del pasado, en el borde oeste de la pluviselva, en el Ecuador oriental. Nos hallábamos en una pista de montaña cerca de Mera, cuyos 1100 metros de altitud en la vertiente este de los Andes la aproxima al límite superior de la pluviselva; el lugar se supone que es uno de los principales refugios. Allí observamos unos viejos troncos y tocones de árboles que se hallaban incrustados en unas capas de sedimento a la vista. Como nos sobraba un poco de tiempo mientras esperábamos el avión que había de llevarnos a un lago distante, tomamos una amplia muestra de sedimentos y de madera. De la datación con ^{14}C de la madera de estas muestras resultó que su edad se situaba entre 35.000 y 26.000 años. Son fechas anteriores al paroxismo de la última glaciación, producido hace 18.000 años; se inscriben, sin embargo, dentro del período glacial.

Mediante otro análisis de las muestras de madera se detectaron maderas blandas, de coníferas. Hoy en día, las únicas coníferas del Ecuador pertenecen al género *Podocarpus*, árboles que medran en los bosques andinos, al menos a 700 metros por encima de la zona de Mera muestreada por nosotros. Y efectivamente, el análisis de polen de las muestras de sedimentos indicó que el antiguo bosque de Mera tenía un carácter netamente andino, sin ningún análogo directo en nuestra América tropical.

De ello inferimos que *Podocarpus*, que requiere unas condiciones ambientales de humedad y frescor hallables hoy sólo en las montañas, crecía, en épocas glaciales, 700 metros más abajo. Sumada a los datos de polen, nuestra conclusión convierte a Mera en una zona húmeda durante la última glaciación, pero demasiado fría para que pudiera desarrollarse el bosque tropical tal como lo conocemos ahora. Mediante una fórmula estándar hemos calculado que la temperatura en las vertientes ecuatorianas era, como mínimo, cuatro o cinco grados inferior a la actual. (Esta fórmula supone que, en aire húmedo, la temperatura baja seis grados por cada 1000 metros de elevación.)

Mera no representaba, pues, ningún refugio para las especies termófilas. Si el descenso de temperatura fue general en toda la cuenca, como parece razonable suponer, entonces otras zonas elevadas de la pluviselva actual podrían haber resultado también frías en exceso para constituir un refugio para especies de la selva. Ante la seguridad de que los árboles típicos de la pluviselva persitieron en algún lugar de la cuenca, los

datos inducen a pensar que el bosque tropical estaba restringido a alguna parte de las zonas bajas, allí donde la teoría del refugio había predicho aridez. Y si los árboles sobrevivieron sólo en los valles, entonces éstos no eran áridos o, al menos, no lo eran de manera uniforme.

Obvio es decirlo, para poder reproducir con fiabilidad una imagen de la Amazonía en tiempos glaciales, se necesita más de un registro de datos de esa época, amén de información relativa al período más frío de la glaciación. Con todo, los datos disponibles sugieren que el modelo de refugios de especies resulta tan endeble como la noción de imperturbabilidad que venía a reemplazar. Sugieren también que la pluviselva se contrae en respuesta a los enfriamientos de los períodos glaciales, para expandirse de nuevo en las épocas interglaciales más cálidas, como la que estamos viviendo actualmente. En resumidas cuentas, se trata de un proceso opuesto al postulado por la teoría de los refugios: algunas zonas de las partes bajas permanecen como reservas de bosque tropical, cálidas y húmedas, y las partes altas (antes consideradas como refugios) se tornan inhóspitas.

¿Cómo explicar entonces la diversidad de especies y los hiatos sacados a la luz por los biogeógrafos? Los cambios climáticos en los períodos glaciales e interglaciales pueden tener su importancia, aunque no la que le atribuyen los defensores de la teoría de los refugios. En mi opinión, durante los períodos templados interglaciales (como el actual) hay una migración de especies de la pluviselva hacia lugares más altos, proceso que ofrece la oportunidad de que se formen nuevas mezclas de especies. Poblaciones procedentes de los valles templados de las glaciaciones podrían adaptarse a las nuevas condiciones ambientales de las alturas y divergir, así, de sus antecesores. Quizá se produjo un fenómeno similar en las poblaciones actuales de aves y mariposas de las tierras altas.

Una segunda parte de la respuesta guarda evidente relación con la diversidad climática y geográfica de la cuenca. El juego de la especiación se ha disputado siempre sobre un inmenso tablero: la Amazonía ocupa casi la extensión de los Estados Unidos. Todas las zonas del tablero se parecen a primera vista y presentan, en verdad, algunas especies en común, pero el territorio general no constituye un solo ecosistema, monolítico; existen diferencias locales y regionales de pluviosidad, estacionalidad, suelos y riesgo de inundaciones. Todo ello puede afectar a la combinación y evolución de las especies en cualquier zona.

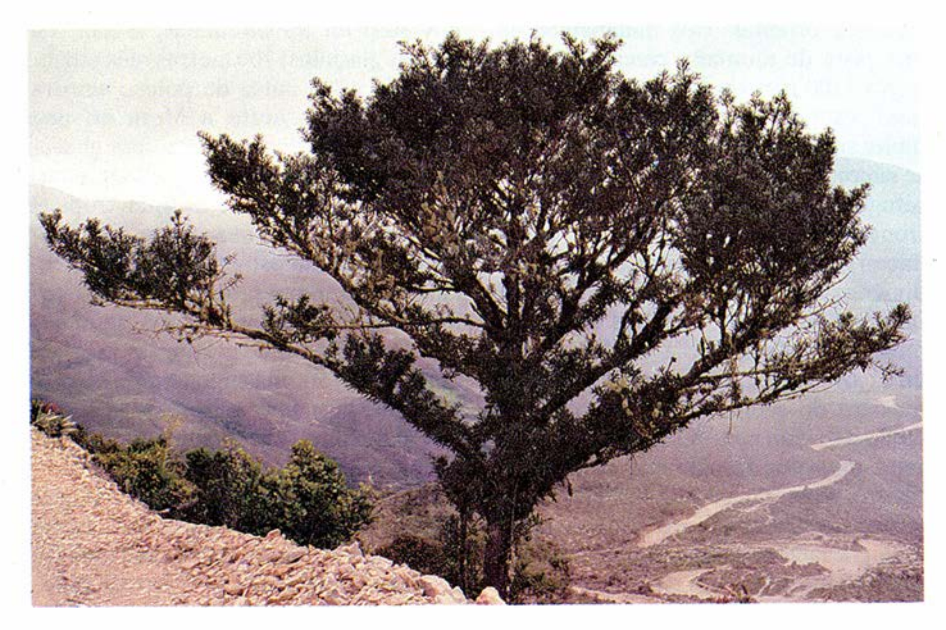
Para explicar la diversidad se recurre también a la hipótesis de la perturbación intermedia, avanzada, sin previo acuerdo, por Joseph H. Connell, de la Universidad de California en Santa Bárbara, y por Stephen P. Hubbel, de la Universidad de Princeton. En virtud de esa hipótesis, la máxima riqueza de especies no se encuentra donde el clima es estable, sino donde las perturbaciones ambientales son frecuentes aunque no excesivas.

La hipótesis de la perturbación intermedia reconoce que las catástrofes masivas llevan a una extinción en gran escala. Eso es lo que ocurriría si un asteroide chocara contra la Tierra, lo que pudo suceder en la época de la extinción de los dinosaurios. Pero catástrofes menores, de ámbito local, como tempestades o inundaciones, no suelen acabar con una especie; antes bien, al afectar a una fracción de la especie dominante, impiden que se materialice una competencia muy desequilibrada, de la que sólo emergerían los dominantes, y traen la oportunidad para que arraiguen organismos en principio más débiles.

Los efectos de las perturbaciones intermedias se aprecian con toda nitidez en los árboles de la pluviselva. En la Amazonía y en otros bosques tropicales se ven, por doquier, grandes claros en el bosque y muchas zonas cubiertas por comunidades de sucesión. Allí donde se crea un calvero por la caída de árboles grandes que forman el vuelo del bosque (como el del caucho y la balsa), acuden a colonizarlo especies de plantas de vida corta y heliófilas, junto con su fauna asociada. Se inicia así una sucesión que, de continuar sin perturbaciones, culminará varios siglos después con una agrupación de árboles gigantes, típica de los bosques tropicales maduros. Efectivamente, los grandes árboles de la selva caen con bastante facilidad porque tienen raíces superficiales: es frecuente que dejen la mitad de su masa radicular en los 20 primeros centímetros del suelo. Basta un fuerte golpe de viento o la erosión del suelo en la base por la crecida del río o por su cambio de recorrido, para abatirlos.

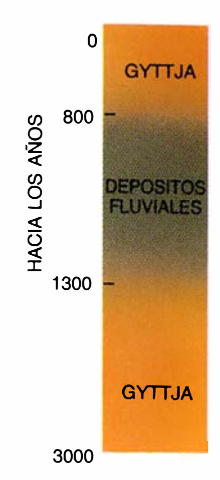
Cada vez hay más datos que abonan la idea según la cual, al menos durante el Holoceno (y probablemente durante toda su historia), esta o aquella región de la Amazonía ha sufrido perturbaciones de origen tormentoso, erosivo u otros. La verdad es que la topografía de la cuenca parece cambiar de un siglo a otro, e, incluso, de década en década.

Parte de lo que se conoce acerca de la historia del Holoceno se apoya en el estudio de los sedimentos que recogi-



4. CONIFERA DE ACICULAS ANCHAS, *Podocarpus oleifolius*. Crece, lo mismo que otras especies del género, por encima de los 1800 metros en los Andes ecuatorianos; no se la ve en la parte ecuatoriana de la selva amazónica, debido quizás a que los árboles necesitan el frescor de las alturas. El autor encontró fósiles de *Podocarpus* en la selva ecuatoriana datados de la última glaciación. Ese descubrimiento resultó decisivo para rechazar la teoría de los refugios como explicación del hiato que se observa entre las especies. El fósil se encontró en Mera, uno de los supuestos refugios: reinaba allí el frío durante la última glaciación y, por consiguiente, no constituyó ningún refugio. Si el frío del antiguo bosque de Mera impedía retener la selva, entonces algunos o todos los demás refugios postulados serían también probablemente demasiado fríos.





5. LAGO AÑANGUCOCHA (*izquierda*), uno de los cuatro lagos ecuatorianos cuyo registro sedimentario demuestra que la parte occidental de la selva amazónica sufrió un período lluvioso, prolongado e insólito, mil años atrás. La capa superior del sedimento (*derecha*) es de gyttja, o fango lacustre típico. Debajo de ella, hay una capa de sedimento fluvial característico, depositado sobre otra capa de fango lacustre hace de 1300 a 800 años. Ello nos indica que el lago Añangucocha, solitario en un comienzo, volvió a recibir sus ríos tributarios durante 500 años, a partir de hace 1300 años, debido tal vez a las crecidas experimentadas por los tributarios tras intensas y repetidas tormentas. Los afluentes abandonaron el lago hace unos 800 años, cuando cesaron las lluvias torrenciales.

mos mis colegas y yo en los lagos ecuatorianos antes mencionados. Nuestros datos más antiguos corresponden a lagos que se hallan en cráteres de volcanes, los únicos lagos de cráter descubiertos hasta la fecha en la cuenca. Uno de ellos, denominado Kumpak[a] en la lengua shuar de los pobladores de la zona, es de aguas turbias, pobres en oxígeno; puede considerarse arquetípico de los lagos alimentados por ríos amazónicos. Otro lago, llamado Ayauch[i], es azul, transparente y bien oxigenado en todo su perfil. Recuerda al lago alpino, algo extraordinario y difícil de encontrar en la jungla.

Mark B. Bush, un investigador de mi laboratorio, quien ha analizado el polen del registro de 7000 años de Ayauch[i] ha encontrado pruebas de la existencia de pluviselva, durante casi todo ese lapso de tiempo, en la región, aunque hubo una prolongada sequía local hace 4000 años, mucho después de terminar la última glaciación. (Halló también señales de agricultura del maíz en sus alrededores, hace unos 3000 años, lo que constituye la cita más antigua de esa práctica en la cuenca.)

Kam-biu Liu, hoy en la Universidad estatal de Louisiana, reconstruyó otra suerte de encadenamiento histórico registrado en los sedimentos de Kumpak[a]. Descubrió capas sucesivas de textura diferente, prueba de un ayer jalonado por fuertes tormentas que habrían arrastrado sedimentos de los márgenes fluviales para depositarlos en el lago. Dicho de otro modo, las tormentas han venido remodelando el terreno alrededor de Kumpak[a], por lo menos durante los últimos 5000 años.

También en la pluviselva ecuatoriana, más al norte, los sondeos que realizamos en cuatro lagos de las llanuras, abandonados siglos atrás por sus tributarios, mostraron la existencia de un largo período, al menos, de fuertes tormentas y de perturbaciones del ecosistema del bosque en el oeste. Las muestras de sedimentos de cada lago tenían una capa superficial de gyttja, fango lacustre típico, depositada 800 años atrás, según datación con ^{14}C. En los cuatro lagos, había, debajo de esa capa, otra de sedimentos fluviales depositada sin interrupción desde hace unos 1300 años. Por tanto, los lagos quedaron abandonados por sus tributarios hace unos 800 años y, desde entonces, no han vuelto a recibirlos.

A nuestro entender, en el período que trascurrió desde hace 1300 años hasta hace 800 años, cayeron lluvias torrenciales en las montañas andinas que ocasionaron inundaciones generales y obligaron a los ríos a discurrir de nuevo por antiguos canales abandonados de las llanuras, que quedaron anegados. El análisis de polen del antiguo sedimento fluvial que hemos realizado indica que los bancos arenosos formados al remitir temporalmente la inundación estaban poblados por árboles de los primeros estadios de la sucesión, mientras que los ejemplares maduros habrían sido barridos por las propias inundaciones.

Marcia L. Absy, del Instituto Pesquero de la Amazonía, en Manaus, ha encontrado también señales de inundación en lagos del centro de la cuenca amazónica. Absy sondeó 5 lagos *varzea* (alimentados por ríos durante la estación húmeda y luego abandonados durante la estación seca) de distintas subcuencas cerca de Manaus, incluidos los lagos alimentados por un drenaje procedente de la zona montañosa de Guayana, por ríos de curso septentrional procedentes del Mato Grosso y por ríos que corren hacia el este y drenan los Andes peruanos y ecuatorianos. Sus datos muestran que sólo los lagos situados al este de las fuentes de drenaje (no los situados al norte o al sur) contienen señales de inundación. Dicho en breve: el período de tormentas fue un fenómeno predominantemente local en la región occidental del Amazonas, que dejó sentir sus efectos de gran alcance en las áreas de drenaje de los ríos muy crecidos.

Así, pues, la Amazonía occidental ha sufrido perturbaciones en el Holoceno; conoció, como mínimo, un drástico cambio climático cuyos efectos perduraron casi un milenio. No me cabe la menor duda de que en esa movida cuenca quedan por descubrir acontecimientos climáticos de similares consecuencias a largo plazo.

Los efectos perturbadores de la erosión por parte de ríos que cambian su curso se manifiestan con plena nitidez en escalas de tiempo menores, de centenares de años. Algunos ríos son rápidos y arrastran el sedimento a gran velocidad; otros, aunque más lentos, erosionan también el terreno a su paso. Muchos cambian de lecho; discurren ahora por un canal, luego por otro. En sus cambios de curso derriban cuanto se les opone y dejan a su paso sedimento listo para ser colonizado. Todos están prestos a desbordarse en períodos lluviosos, momento en el que arras-

tran árboles de sus orillas y renuevan el paisaje. Los turbios afluentes occidentales del Amazonas muestran especial actividad. En efecto, a tenor de diversas estimas el 80 por ciento de los sólidos en suspensión del bajo Amazonas provendrían del oeste.

Basándonos en datos publicados sobre el contenido sólido descargado anualmente en la desembocadura del río Amazonas, mi grupo intentó calcular la tasa de erosión que la región occidental sufre por acción de los grandes ríos que drenan los Andes. Aunque se trata de un ejercicio de peligrosa extrapolación, nos da idea de que el perfil del suelo desciende varios centímetros cada siglo. Quizá podría perderse la mitad de la profundidad del suelo enraizado de un árbol maduro típico del Amazonas en un tiempo inferior al de la vida normal del árbol.

Jukka S. Salo y su equipo, de la Universidad finesa de Turku, trabajando en la Amazonía peruana, han encontrado mejores pruebas de la perturbación causada por la erosión en la región occidental. Con la ayuda de satélites, han construido mapas de distintos tipos de vegetación que incluyen lo mismo comunidades de las fases iniciales de la sucesión (que crecen en el sedimento dejado atrás por los ríos al cambiar progresivamente de canal de drenaje) que comunidades maduras (éstas aparecen centenares de años después del abandono de un banco fluvial). Mediante estos mapas han determinado que, en el último par de siglos, se arrasó la cuarta parte del bosque peruano, recolonizado luego por nuevas comunidades.

Los ríos perturban también el terreno en intervalos más breves. Gracias a la cartografía aérea, revisada tras un período de 13 años, Salo y sus colaboradores, demostraron que un riachuelo había rehecho el 3,7 por ciento de su área de drenaje en ese intervalo, con una erosión anual del suelo de una docena de metros, en promedio.

A casi nadie le extraña que la selva amazónica sufra las consecuencias de tormentas, inundaciones y erosión. Pero muy pocos sospechan que la perturben incendios espontáneos. Lo cierto es que los árboles de la selva amazónica se queman. Recientemente, Robert L. Sandford, de la Universidad de California en Berkeley, y otros investigadores encontraron capas de carbón vegetal en suelos turbosos en Venezuela meridional, en el extremo norte de la cuenca amazónica. La datación con ^{14}C puso de manifiesto que algunas muestras tenían unos 6000 años; pertenecían, por tanto, a una época anterior a la penetración humana en la región. Así, pues, algunas de las capas de carbón, por lo menos, serán restos de fuegos naturales.



6. RIO NAPO, en el Ecuador. Erosiona sus orillas y derriba los árboles. Se trata de uno de los múltiples cursos que renuevan constantemente la topografía de la selva. El autor sostiene que el ecosistema amazónico está adaptado a este tipo de perturbaciones, que dejan supervivientes, pero no lo está a la catástrofe de las talas masivas y extensas roturaciones a que lo somete hoy el hombre. (Fotografía de Paul A. Colinvaux.)

¿Por qué ardieron? Los árboles de la pluviselva pueden considerarse depósitos de energía enfriados por agua. Durante el día, absorben la intensa radiación solar por medio de su extensa superficie tejida de hojas delgadas y anchas; el proceso sólo es posible si disipan calor a través de la evapotranspiración de grandes cantidades de agua. Sandford cree que basta un mes sin precipitaciones para que los árboles consuman toda la reserva hídrica disponible en el suelo ocupado por su aparato radicular, expuesto en superficie. Tras ello, las hojas se marchitarían, se recalentarían y terminarían por desprenderse. Los rayos solares atravesarían la copa desnuda, secarían la hojarasca caída y propiciarían el incendio provocado por una combustión espontánea o por un relámpago. Un período de sequía de estas características puede producirse en la selva una vez o dos, en intervalos de algunos miles de años.

Dedúcese, pues, que la cuenca amazónica ha sido desde antiguo una región sometida a distintas agresiones. En tiempos glaciales, si nuestra serie de datos es representativa de lo acontecido allí, el suelo tiende a enfriarse y el bosque retrocede. En épocas más cálidas, la selva amazónica queda probablemente a merced de los tipos de perturbaciones descubiertos en los sedimentos lacustres y en otros registros del Holoceno. Distintas zonas en momentos diferentes sufren el azote de tormentas, inundaciones y erosión, y arden durante los raros períodos sin precipitaciones. Pocas zonas parecen mantenerse libres de perturbaciones por más de uno o dos siglos. El resultado actual es un mosaico de claros, fases iniciales de la sucesión y bosque maduro, con un magnífico surtido de especies animales y vegetales.

¿Qué enseñanzas hemos de sacar para el futuro del ecosistema amazónico, tan gravemente amenazado hoy por el hombre? La acumulación de especies en un lugar de cambio constante nos indica que la fauna y la flora toleran cierto grado de actividad humana, siempre que ésta se mantenga dentro de las perturbaciones intermedias, que dejan supervivientes. Pero conviene poner de relieve que nunca en la historia de la cuenca se había producido algo parecido a la tala masiva de nuestros días. Esa agresión debe encuadrarse dentro de las formas catastróficas de perturbaciones naturales que condujeron en el pasado a la extinción de gran número de especies.

Además, los animales de mayor por-

te que habitan la pluviselva no pueden soportar el efecto devastador de las modernas armas automáticas. Los primates vegetarianos, los perezosos que se alimentan en las copas de los árboles y sus depredadores, como el águila real (una máquina de destrucción tan poderosa que puede arrancar a un mono de las ramas), son víctimas fáciles de los rifles. Un sujeto pertrechado con un rifle de calibre 16 puede eliminar en un año todas las águilas y primates en un radio de 10 kilómetros a la redonda; pues bien, no una, miles de personas han hecho justamente esto. La única esperanza para estos animales son las reservas protegidas. En ese sentido, los gobiernos de la Amazonía están acotando parte del territorio con esos fines. La extensión adecuada que deben alcanzar tales refugios constituye hoy un tema de intensa investigación.

Los árboles son otra historia. La realidad es que gran parte de la cuenca amazónica se convertirá en pastos a medida que los colonos van talando y creando espacios para el ganado. La única esperanza que les queda a los árboles, y quizá también a otras plantas e insectos, tal vez resida en la explotación racional: descubrir formas de aprovechar la riqueza del resto de la selva sin infligir a las especies más penalidades de las que pueden soportar. Podrían dejarse algunas zonas para el ocio o para industrias cuyos productos no requieran grandes cantidades de energía y no contaminen el ecosistema. La historia de la Amazonía nos da pie a pensar que pueden explotarse algunas zonas sin provocar una extinción en masa. El uso racional tiene, pues, la última palabra.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

SEDIMENTATION AND SEDIMENTS OF AMAZONIAN RIVERS AND EVOLUTION OF THE AMAZONIAN LANDSCAPE SINCE PLIOCENE TIMES. G. Irion en *The Amazon: Limnology and Landscape Ecology of a Mighty Tropical River and Its Basin*, dirigido por Harald Sioli. Dr. W. Junk Publishers, 1984.

BIOGEOGRAPHY AND QUATERNARY HISTORY IN TROPICAL AMERICA. Dirigido por T. C. Whitmore y G. T. Prance. Oxford University Press, 1987.

AMAZON DIVERSITY IN LIGHT OF THE PALEOECOLOGICAL RECORD. Paul Colinvaux en *Quaternary Science Reviews*, vol. 6, n.º 2, págs. 93-114; 1987.

PLEISTOCENE FOREST REFUGES IN THE AMAZON: EVALUATION OF THE BIOSTRATIGRAPHICAL, LITHOSTRATIGRAPHICAL AND GEOMORPHOLOGICAL DATA. Jukka Salo en *Annales Zoologici Fennici*, vol. 24, págs. 203-211; 1987.

Creación de elementos superpesados

Los núcleos con masas mucho mayores que los encontrados en la naturaleza se estabilizan gracias a ciertos efectos mecánico-cuánticos. Los experimentadores han tenido que revisar los métodos al uso para poder lograr la síntesis deseada

Peter Armbruster y Gottfried Münzenberg

Durante los últimos veinte años, físicos de todo el mundo han estado ocupados en la preparación de elementos superpesados. En el Instituto de Investigación de Iones Pesados (GSI) de Darmstad, hemos conseguido la síntesis de los núcleos de los elementos 107, 108 y 109. Estos núcleos se sitúan más allá de los límites de 106 protones que imponían las técnicas utilizadas anteriormente en la creación e identificación de elementos pesados.

Las mediciones experimentales de masas, enmarcadas luego en la teoría pertinente, demuestran que los nuevos elementos deben su estabilidad a la disposición microscópica de sus protones y neutrones, pero no a las propiedades macroscópicas que estabilizan los núcleos ligeros. Por otra parte, nos hemos enfrentado con problemas que, hasta ahora, nos han impedido alcanzar los objetivos propuestos desde finales de los años sesenta, cuando parecía posible obtener hasta el elemento 114. Sin embargo, el trabajo realizado para vencer los obstáculos interpuestos y para continuar progresando en este campo ha permitido profundizar en la estructura nuclear y en la dinámica de las reacciones de fusión entre núcleos.

La nucleosíntesis ha recorrido un largo camino desde los años en que se crearon, en los reactores nucleares, elementos inexistentes en la naturaleza. Los físicos han utilizado proyectiles cada vez más pesados para bombardear blancos atómicos; el último avance es la denominada "fusión fría", un proceso en el que las masas y las energías de bombardeo se selecionan cuidadosamente, con el fin de que la energía de excitación de los núcleos recién constituidos sea mínima.

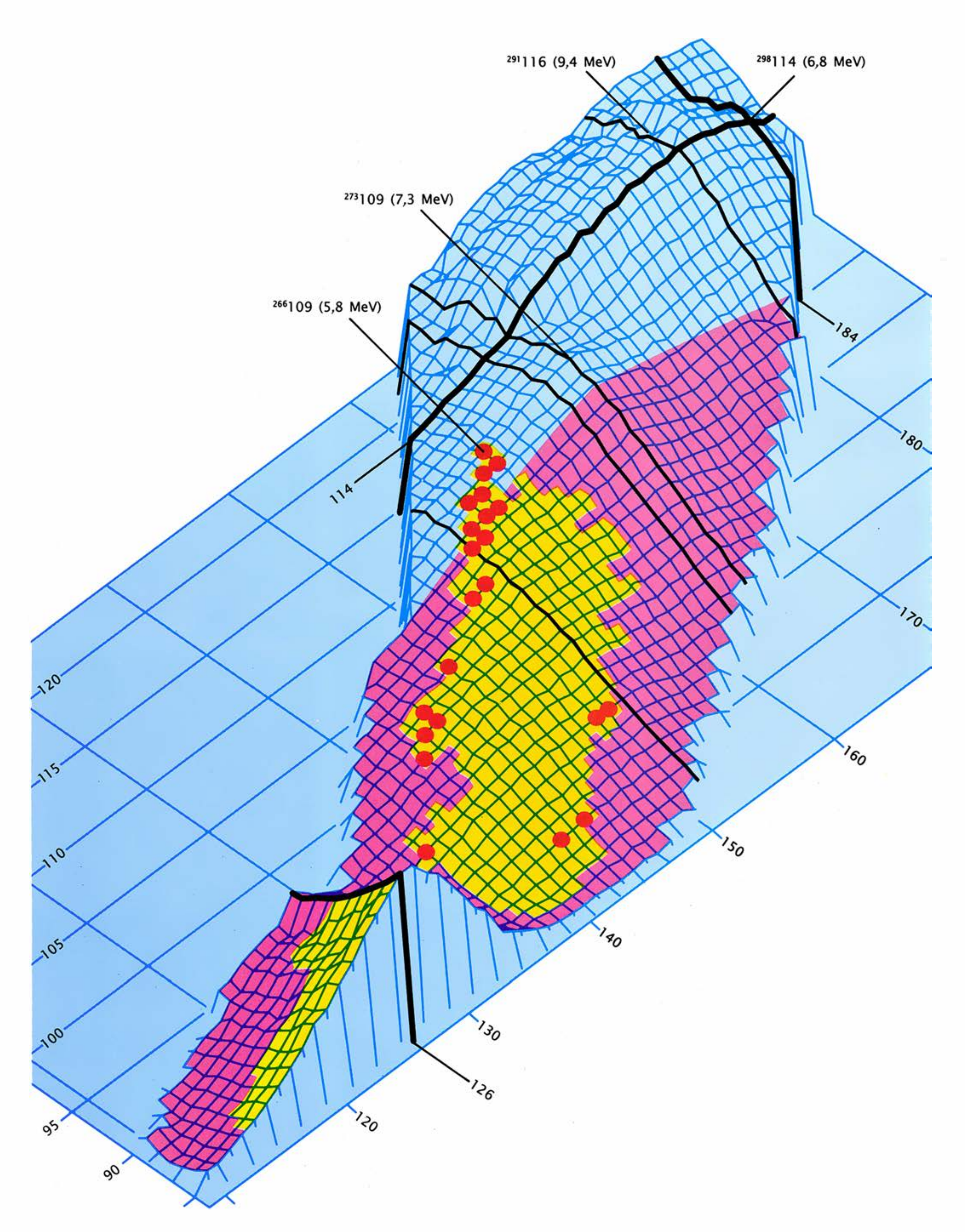
En el curso de nuestro trabajo hemos ido comprobando cómo las ideas de partida acerca de la síntesis de elementos superpesados eran erróneas: los núcleos de los elementos susceptibles de sintetizarse no tienen forma esférica, según se creía en 1966, sino que están deformados. En el proceso de fusión utilizamos núcleos esféricos estables y naturales, así como proyectiles de masa media, en lugar de núcleos radiactivos artificiales muy pesados y proyectiles ligeros, que era lo que se postulaba hasta entonces. La fusión debe ocurrir con las energías de bombardeo más bajas posibles, y no, según se suponía, con una energía de impacto desproporcionada, capaz de provocar el proceso por la fuerza bruta.

La idea de sintetizar elementos transuránidos (elementos cuyo número atómico es mayor que 92) surgió ya en la década de los treinta. En el año 1934, Enrico Fermi bombardeó talio con neutrones lentos para obtener plomo por desintegración beta (la desintegración de un neutrón en un protón y un electrón). La captura de neutrones seguida por la desintegración beta produce elementos cuyo número atómico es una unidad mayor que el del elemento original.

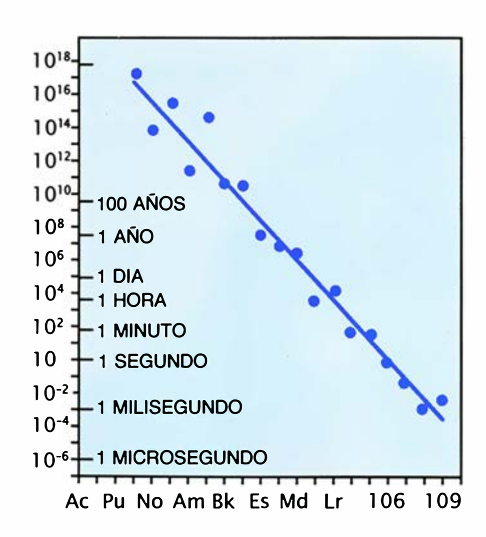
Entre 1940 y mediados de los años cincuenta, se produjeron los elementos 93, 94, 99 y 100 por irradiación con neutrones. El fermio 100 fue el último de una cadena de elementos obtenidos por el proceso de captura de neutrones y desintegración beta, sugerido por Fermi: ninguno de sus isótopos muestra desintegración beta. Durante esos mismos años, los elementos 95, 96, 97, 98 y 101 se obtuvieron por irradiación alfa, un proceso en el que los núcleos pesados absorben dos protones y dos neutrones, con lo cual se produce de un solo golpe un salto de dos escalones en el número atómico. Al igual que todos los elementos pesados, los transuránidos contienen más neutrones que protones. Por ejemplo, uno de los isótopos corrientes del plutonio (elemento 94) contiene 145 neutrones y una masa total de 239; el isótopo de vida más larga del fermio posee 157 neutrones y una masa total de 257.

Una forma obvia de crear elementos por encima de 100 se basa en la fusión de núcleos de los elementos más pesados con núcleos de elementos ligeros que contengan más protones y neutrones que el helio. Los elementos inferiores al 99 resultaban adecuados para este fin, dado que podían producirse en cantidades macroscópicas importantes. En los laboratorios de Berkeley (Estados Unidos) y Dubna (Unión Soviética) se desarrollaron aceleradores que estaban dotados para producir iones pesados con una energía capaz de superar las fuerzas electrostáticas que se oponen a la fusión. Entre los años 1958 y 1974, esos aceleradores permitieron sintetizar los elementos 102 a 106. Per-

PETER ARMBRUSTER y GOTTFRIED MÜNZENBERG trabajan en la síntesis de elementos superpesados en el Instituto de Investigación de Iones Pesados (GSI) de Darmstadt. Armbruster dirige un grupo de investigación en química nuclear y física atómica; sus intereses personales se centran en las reacciones entre núcleos pesados y el uso de iones pesados en el estudio de problemas de física atómica y física del estado sólido. Recibió su doctorado en la Universidad Técnica de Munich. Münzenberg ha permanecido en el grupo de Armbruster, en el GSI, desde 1976. Ha trabajado en las propiedades de los estados fundamentales de los núcleos pesados, la fusión fría de iones pesados y la producción y separación de núcleos exóticos. Se doctoró por la Universidad de Giessen; mientras residía allí, diseñó el filtro de velocidad SHIP con destino al GSI y supervisó su construcción.



1. LAS CAPAS NUCLEARES COMPLETAS (*líneas negras*) caracterizan los núcleos que poseen un número determinado de protones y neutrones y que, como consecuencia de ello, gozan de una estabilidad mayor. Las correcciones por capas representadas en esta figura incrementan la energía de enlace de los núcleos y posibilitan la existencia de isótopos que no permanecerían estables si se limitaran a ser gotas de un "fluido nuclear". La barrera de fisión para las gotas líquidas (*en rosa*) desaparece para el elemento 107. Los efectos de capas alcanzan su máximo valor en las proximidades del plomo (*abajo, izquierda*) y aumentan de nuevo en la región de los elementos superpesados. Los círculos señalan los números de protones y neutrones de los isótopos sintetizados por los autores.



2. VIDA MEDIA de distintos elementos radiactivos: cae drásticamente conforme va aumentando la masa. Los elementos más pesados producidos hasta la fecha se desintegran casi inmediatamente una vez se han sintetizado y, por tanto, hacen necesarios nuevos métodos para detectarlos e identificarlos.

siste todavía la disputa en torno a la primacía del descubrimiento de estos elementos y el privilegio consiguiente de darles nombre.

Los procedimientos que resultaron tan útiles en Berkeley y Dubna han fracasado en la producción de elementos más allá del 106. Para comprender por qué es tan difícil sintetizar elementos superpesados —y por qué algunos de ellos resultan particularmente estables—, hemos de conocer las causas de la estabilidad de los núcleos en general y la razón por la cual el equilibrio de las diferentes fuerzas que gobiernan dicha estabilidad se altera cuando la masa de los núcleos aumenta. Los efectos que resultan despreciables en los núcleos más pequeños adquieren gran importancia en el caso de los núcleos pesados y determinan la diferencia entre inestabilidad absoluta y relativa vida prolongada en los mayores.

La característica fundamental de todos los núcleos es la combinación entre la fuerza nuclear intensa, que mantiene unidos protones y neutrones, y la fuerza electrostática, que tiende a separar los protones. A medida que los núcleos se hacen más pesados, su contenido relativo de neutrones aumenta; esta propiedad compensa las fuerzas repulsivas que se ponen de manifiesto entre los protones. Sin embargo, la intensidad del enlace entre los nucleones alcanza su máximo valor en el caso del hierro (26 protones y 30 neutrones), que ocupa un lugar situado a menos de la primera cuarta parte del sistema periódico de los elementos, y disminuye a partir de este elemento.

Aunque la división de cualquier núcleo más pesado que el hierro puede liberar energía, se precisa tanta para fragmentar los núcleos más ligeros que el plomo que este tipo de reacciones sólo acontece bajo condiciones extraordinarias. Dado que los núcleos más pesados que el plomo son capaces de alcanzar un estado más fuertemente ligado con la mera emisión de una pequeña parte de sí mismos, resultan inestables. La mayoría de los isótopos naturales del torio y del uranio se desintegran emitiendo una partícula alfa. Unicamente en el caso del uranio y de los elementos más pesados que él se produce la fisión nuclear de forma espontánea y sin excitación.

En general, los núcleos atómicos se hacen más inestables a medida que su número atómico (el número de protones que existe en un núcleo) aumenta: las vidas medias disminuyen de miles de años a millonésimas de segundo. Sin embargo, las teorías de la estructura nuclear nos inducen a suponer que los elementos un poco más pesados que los creados hasta ahora serán más estables que ellos.

Los núcleos portadores de ciertas combinaciones de neutrones y protones poseen energías de enlace elevadas; el helio 4, el oxígeno 16, el calcio 40, el calcio 48 y el plomo 208 son muy estables en comparación con sus vecinos inmediatos. Estas altas energías de enlace se deben a la existencia de una estructura de capas, equivalente a las capas en que los electrones atómicos se organizan alrededor de los núcleos. Las configuraciones de nucleones que forman capas totalmente ocupadas gozan de notable estabilidad. En el caso del plomo, la estructura de capas incrementa la energía de enlace del núcleo en unos 11 millones de electronvolt (MeV), en relación con un hipotético modelo en forma de gota sin estructura (modelo de la gota líquida) que posea el mismo número de neutrones y de protones que dicho núcleo. Para la mayoría de los núcleos, cuyas energías de enlace son del orden de 2000 millones de electronvolt, este incremento resulta insignificante. Sin embargo, para los elementos más pesados, con una estabilidad muy precaria, la citada "estabilización de capas" puede significar la diferencia entre una desintegración instantánea y una vida bastante larga.

Los núcleos con capas de neutrones y de protones "cerradas" (completas) son particularmente estables; después del plomo, la siguiente de estas capas cerradas se produce para 114 protones y 184 neutrones. El éxito de la teoría estratiforme en la predicción de las energías de enlace de los núcleos más ligeros alimentó la idea según la cual los núcleos con masas próximas a 298 podrían estabilizarse tan fuertemente que —como sucede en el caso del uranio y del torio— formarían una región de elementos bastante estables. Sin embargo, al contrario de lo que sucede con los elementos de la región de uranio-torio, estos elementos superpesados y estabilizados por capas serían inestables desde el punto de vista de las gotas homogéneas de materia nuclear.

El primero de los elementos superpesados estabilizados por capas, el 107, cuyas propiedades coinciden con las predichas para el *eka*renio por Fermi, fue identificado en Darmstadt en 1981, cuarenta y siete años después de su predicción. Con posterioridad a dicha fecha, se han identificado también los elementos 108 y 109. Las mediciones de sus energías de enlace demuestran que nos encontramos ya en la región de los elementos superpesados. Estamos investigando los límites que condicionan la producción de elementos todavía más pesados.

La síntesis de elementos pesados por fusión exige que el experimentador se mueva por un camino muy estrecho, situado entre los métodos de bombardeo que no dan lugar a reacción alguna y los que dan lugar a que el núcleo producido en la fusión se desintegre por fisión, en vez de formar un estado relativamente estable. El calentamiento reducido de los núcleos recién formados constituye la razón principal para cambiar el método de bombardeo con iones ligeros sobre núcleos diana bastante pesados por el bombardeo de núcleos no tan pesados con iones relativamente más pesados (un cambio propuesto por Yuri Oganessian y sus colaboradores en Dubna). Por ejemplo, cuando el plomo 208 o el bismuto 209 se funden con cromo 54 o hierro 58, la energía de excitación del núcleo formado es del orden de 20 MeV. En cambio, en la fusión de núcleos actínidos pesados (californio 249, berkelio 249 o curio 248) con carbono 12, nitrógeno 15 u oxígeno 18, la energía de excitación resultante es del orden de 45 MeV.

Los núcleos formados a partir de iones ligeros y núcleos actínidos se relajan emitiendo cuatro neutrones. En contraste, los núcleos formados a partir de plomo o bismuto e iones más pesa-

dos se relajan emitiendo un único neutrón. Dado que la probabilidad de que un núcleo se enfríe emitiendo un neutrón es sólo de un escaso porcentaje con respecto a la probabilidad de que sufra una fisión, cada proceso de emisión de neutrón por parte de un núcleo reduce significativamente el rendimiento final de producción de núcleos superpesados. En consecuencia, el mecanismo de relajación por emisión de un neutrón es mucho más favorable para que un núcleo recién formado permanezca intacto.

Pero la fusión fría no está exenta de inconvenientes: las fuerzas electrostáticas repulsivas entre los dos núcleos dificultan la fusión de los mismos. Cuando dos núcleos se acercan entre sí, parte de su energía cinética se convierte en energía de excitación del sistema transitorio formado en la colisión y no se la puede reclamar para superar la barrera de fusión, con lo que disminuye la probabilidad de que se produzca una fusión. En el proceso de fusión fría que utiliza iones pesados, se convierte una mayor cantidad de energía cinética durante el ascenso y el paso a través de la barrera de fusión y, por tanto, la probabilidad de que pueda superarse la barrera de fusión mengua considerablemente en relación con una reacción entre iones ligeros y blancos, o dianas, más pesados.

Si se aumenta la energía inicial para compensar tales pérdidas, aumenta la energía de excitación y disminuye el número de núcleos que sobreviven. En virtud de ello, el proceso de fusión fría sólo resulta ventajoso más allá del elemento 106. Los autores de este artículo han demostrado que las secciones eficaces de formación de elementos pesados más elevadas se sitúan en un estrecho intervalo de energías, a unos 5 MeV por encima de la barrera de fusión.

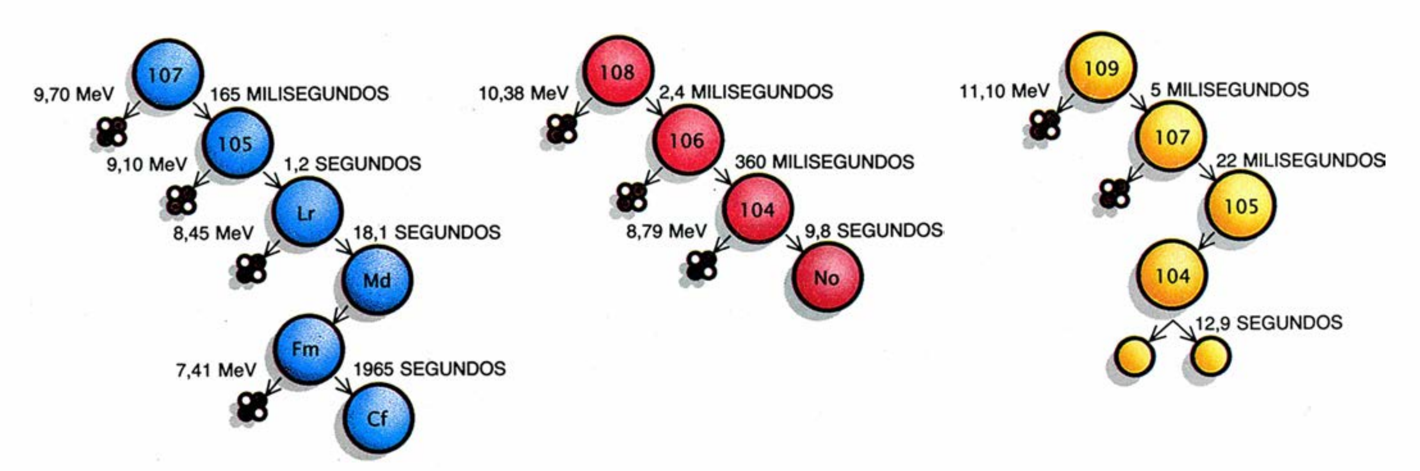
En tanto que la teoría relativa a la producción de núcleos superpesados puede convertirse en un ejercicio interesante, la práctica es asunto mucho más complejo. Las teorías deben ocuparse del diseño de aceleradores y dianas, así como del desarrollo de los detectores capaces de comprobar la existencia de núcleos superpesados, una vez se han sintetizado. Cuando la idea de obtener elementos superpesados atrajo la atención de los físicos, a finales de la década de 1960, nadie en Alemania tenía experiencia en el campo de la nucleosíntesis. Para los recién incorporados en dicho campo, las vías de ataque eran múltiples. Se podía aprender mucho de los centros de Berkeley y Dubna, pero estaba claro que no se avanzaría si se limitaban a copiar el trabajo realizado en esos centros. Precisaban un acelerador de iones pesados, métodos de separación rápidos para aislar los nuevos elementos y las técnicas adecuadas para identificarlos. La cuestión relativa a qué reacciones nucleares conducirían al éxito estaba todavía pendiente de respuesta.

En 1969, el gobierno federal y el regional de Hessen se pusieron de acuerdo para establecer conjuntamente un nuevo instituto dedicado a la investigación de iones pesados (Gesellschaft für Schwerionenforschung) con sede en Darmstadt. El acelerador lineal universal (UNILAC), en torno al cual se desarrolla el trabajo del GSI, ha venido funcionando desde 1975.

El UNILAC puede acelerar toda clase de iones, anteriores al uranio, y él incluido, hasta energías que superen la barrera de Coulomb. Este acelerador fue diseñado para producir corrientes de iones con la máxima intensidad posible. En particular, se hizo un considerable esfuerzo para que la energía de los iones pudiera variar a pasos pequeños y permitir su ajuste a un valor determinado con precisión y de forma reproducible. Del proyecto del acelerador se encargaron Christoph Schmelzer y sus colaboradores, de Heidelberg. Se aprovechó la experiencia de otros centros: las fuentes de iones constituyen una versión modificada de las utilizadas en Dubna para producir iones de carga elevada; asimismo, la estructura desarrollada por Alvarez en Berkeley forma parte del acelerador lineal de alta frecuencia.

Con el UNILAC todavía en fase de construcción, muchos grupos se plantearon cómo utilizar mejor el acelerador. ¿Qué reacciones y qué técnicas deberían usarse? En su infancia, el UNILAC sirvió para comprobar toda clase de ideas, pero el éxito se lo llevó una estrategia concreta: la fusión fría acoplada con el transporte de los productos de la fusión por retroceso.

Desde el descubrimiento del plutonio en 1941, se han sintetizado unas 400 toneladas de este elemento, una cantidad correspondiente a 10^{30} átomos. Por otra parte, se han producido e identificado tan sólo algunos átomos del elemento 109. ¿Por qué los elementos más pesados se han producido en cantidades tan pequeñas? A lo que debe responderse: para crear plutonio, se bombardean bloques de uranio 238



3. ELEMENTOS SUPERPESADOS 107, 108 y 109, identificados de acuerdo con los esquemas de desintegración observados en el Instituto de Investigación de Iones Pesados (GSI) de Darmstadt. Los detectores midieron las masas del producto de fusión resultante, seguido por una serie de emisiones de partículas alfa y, en el caso del elemento 104, una fisión espontánea. La probabilidad de que las correspondientes señales se produzcan por azar es menor que una en mil billones; en consecuencia, la observación de una sola serie de desintegraciones es suficiente para demostrar la existencia de un elemento superpesado.

de varios centímetros de espesor, con toneladas de neutrones; el UNILAC, por otra parte, sólo ha acelerado 100 microgramos de hierro 58 sobre blancos de plomo 208, con un espesor de algunos centenares de nanómetros. Además, la sección eficaz de captura de neutrones, la reacción que da lugar a la producción de plutonio 239, es unos 10 trillones de veces mayor que la sección eficaz de la fusión nuclear que da lugar al elemento 109.

La dificultad cada vez mayor de producir elementos más y más pesados constituye sólo una parte de la historia. Una vez sintetizados, los elementos tales como el 109 se desintegran tan rápidamente que la síntesis no puede compensar la desintegración. Los elementos más pesados tienen una vida tan corta que, al acabar la irradiación, todos los átomos creados se han desintegrado ya. En consecuencia, dichos átomos deben detectarse e identificarse durante el mismo proceso de producción.

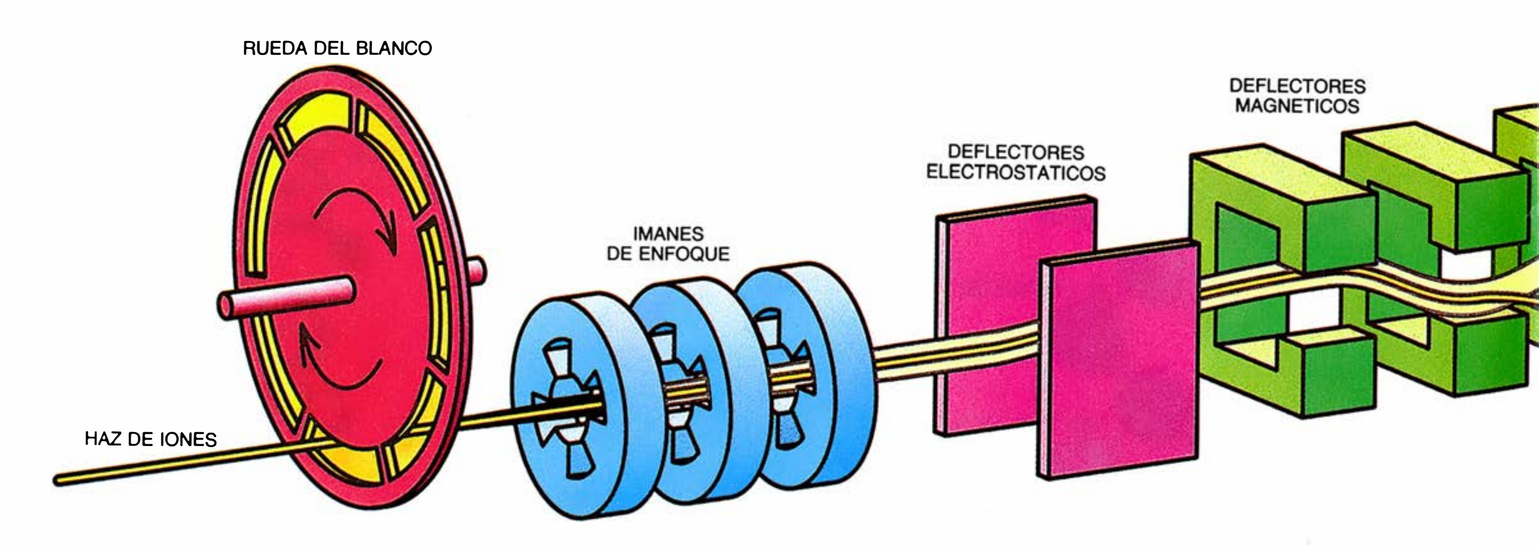
Cuando hablamos de elementos por debajo del 106, las técnicas de producción y detección descansaban esencialmente en medios mecánicos para transportar los elementos recién producidos fuera de la zona de reacción, hasta un detector. El tiempo de transporte entre la creación y la detección de los productos de la reacción venía determinado por magnitudes tales como las velocidades del flujo de los productos de reacción en fase gaseosa, los tiempos de difusión de dichos productos desde las superficies de un sólido o la velocidad de rotación de las ruedas en que estaban situados los blancos. Sin embargo, todas estas técnicas no nos facultaban todavía para detectar elementos por encima del 106; imponían limitaciones inaceptables entre la velocidad y la precisión en la detección, de forma tal que la utilización de los métodos más rápidos no permitían identificar los isótopos producidos con seguridad.

La técnica que adoptamos en Darmstadt consistía en dejar que la velocidad de retroceso impartida a los productos de la reacción por los iones pesados incidentes transportara los núcleos recién formados hasta nuestro detector. Cuando un ion pesado bombardea un átomo diana y se funde con él, el núcleo resultante se mueve a lo largo de la trayectoria del ion original, con una velocidad de varias centésimas de la velocidad de la luz. Gracias a este proceso, es posible detectar núcleos con vidas medias de hasta unos 100 nanosegundos.

Aunque la técnica de transporte por retroceso permite detectar e identificar los núcleos de vida muy corta, complica el aparato de detección. Los núcleos que se forman en la reacción de fusión no son los únicos que se mueven hacia fuera de la zona de reacción con altas velocidades, sino que también lo hacen trillones de iones pesados y miles de átomos procedentes de la lámina del blanco. Para separar los núcleos superpesados del resto del haz, procedimos a instalar un filtro de velocidades (conocido como SHIP, por las siglas inglesas de la expresión "separador de los productos de reacción de iones pesados"), desarrollado en colaboración con el Segundo Instituto de Física de la Universidad de Giessen. De acuerdo con la cinemática de la colisión y la reacción de fusión, todos los productos de fusión retroceden con una velocidad que se puede calcular con facilidad. En consecuencia, se pueden separar de forma bastante sencilla.

El filtro consta de dos pasos, cada uno de los cuales utiliza campos magnéticos y eléctricos. Los dos campos tienden a desviar las partículas cargadas en direcciones opuestas; ambos efectos se compensan únicamente para aquellos núcleos que se muevan con la velocidad correcta, de forma tal que los núcleos en cuestión seguirán moviéndose a lo largo del plano central del dispositivo. Nuestro doble filtro reduce el número de iones acelerados que entran en la zona de detección en un factor de 100.000 millones y el número de núcleos de retroceso procedentes del blanco en un factor de 1000.

El espectrómetro SHIP, que elimina casi todas las partículas indeseadas del haz, deja que pasen más del 40 por ciento de los productos de fusión. Los detectores situados a continuación del espectrómetro registran las cadenas de desintegración de las partículas que han atravesado dicho dispositivo, y así



4. FILTRO EFICIENTE, cuyo empleo resulta decisivo para detectar e identificar elementos superpesados. Las señales del haz de iones que bombardea la rueda del blanco saturarían, si no hubiera tal, el sistema detector. El filtro SHIP (separador de los productos de reacción de iones pesados) utilizado en el Instituto de Investigación de Iones pesados (GSI) de Darmstadt consta de dos conjuntos de deflectores electrostáticos y magnéticos que permiten que sólo los iones que

los productos de fusión pueden identificarse con absoluta seguridad.

El primer elemento del sistema de detección final es un detector de tiempo de vuelo, capaz de medir la velocidad de una partícula por tercera vez (las dos mediciones que le preceden constituyen la base de los filtros de velocidad). Después de atravesar el detector de tiempo de vuelo, la partícula incide sobre unos detectores de barrera de superficie de silicio espacialmente sensibles; estos detectores registran su posición y su energía. La combinación del tiempo de vuelo y la energía permite una determinación aproximada de la masa; de esta forma, podemos distinguir, de los iones difundidos y de los núcleos de retroceso procedentes del blanco, los productos de fusión.

Ahora bien, para identificar con plena seguridad un núcleo, es necesario que su desintegración se halle en correlación con las desintegraciones de sus productos descendientes radiactivos. Todos los productos de desintegración originados por un núcleo tendrán las mismas coordenadas espaciales; los núcleos descendientes resultantes de dicha desintegración sufrirán, a su vez, procesos de desintegración cuya naturaleza, energía y vida media son ya conocidas con antelación.

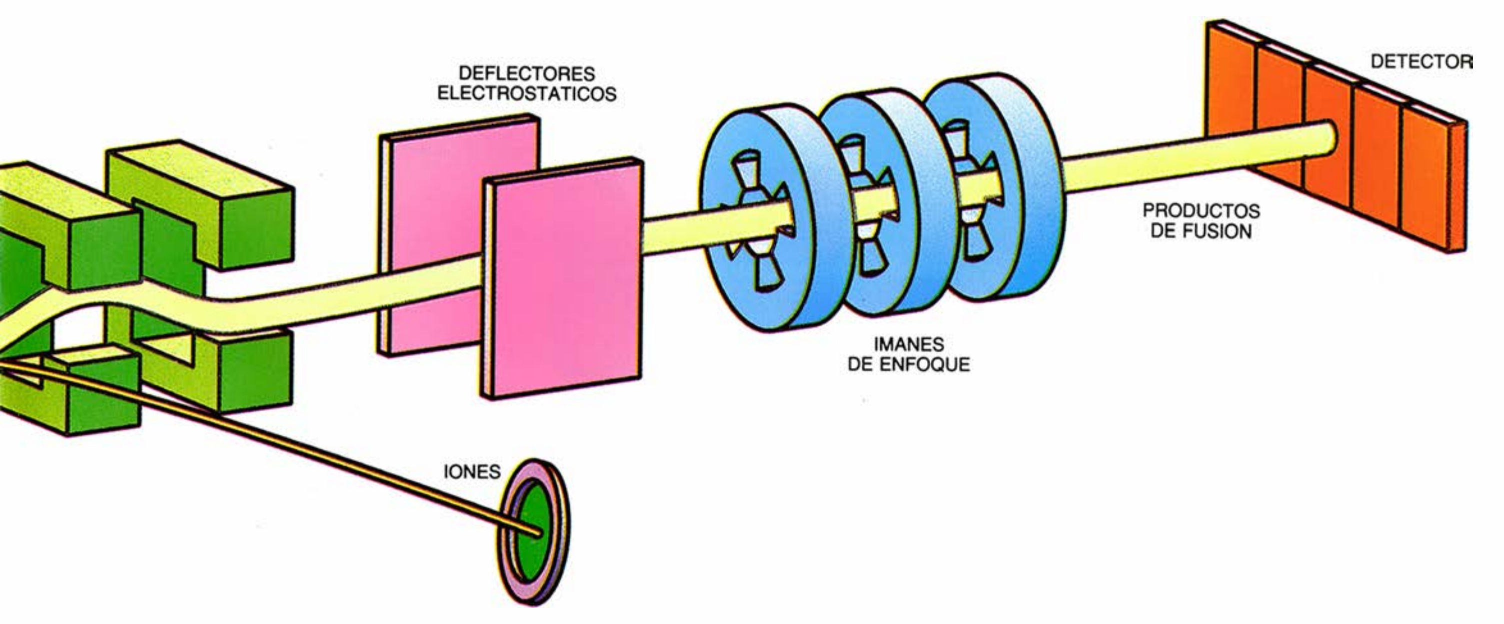
La observación de estas desintegraciones correlacionadas permite identificar sin ambages todos los productos de fusión. Aunque una partícula espúrea, situada en el mismo lugar que nuestro presumible producto de fusión se desintegrara y causara una señal correlacionada espacialmente, resulta muy improbable que su energía de desintegración, su vida media y la naturaleza del proceso coincidieran con las predichas para el producto de fusión en cuestión. Hemos observado estas cadenas de desintegración hasta la cuarta generación; la probabilidad de que todas estas series de sucesos correlacionados obedecieran al azar está comprendida entre una unidad en 10^{18} y una en 10^{21}. Si los sucesos correlacionados de un isótopo deseado acontecieran a razón de uno al día, tendríamos que esperar un tiempo del orden de 100 veces la edad de la Tierra para ver una señal espúrea que abarcase las cuatro generaciones de desintegraciones. Fruto de esa situación, basta un solo suceso para demostrar inequívocamente la existencia de un determinado isótopo superpesado.

Entre 1981 y 1986, los autores de este artículo y sus colaboradores, Peter Hessberger, Sigurd Hofmann, Matti Leino, Willibord Reisdorf y Karl-Heinz Schmidt, han utilizado el UNILAC y su sistema de detección para sintetizar e identificar los elementos 107, 108 y 109. En el curso de estos experimentos, hemos sintetizado 14 isótopos de los elementos 104 al 109 (cinco de los cuales eran ya conocidos), así como dos isótopos más de los elementos 107 y 108, con números másicos 261 y 264, respectivamente.

En 1981 produjimos un isótopo del elemento 107 con número másico 262 bombardeando bismuto 209 con cromo 54. Para el isótopo impar-impar del elemento 107 −constituido por un número impar de protones y un número impar de neutrones− conocemos cinco energías de desintegración alfa (un dato que proporciona información acerca de los niveles energéticos del núcleo); sabemos también que dicho isótopo posee un isómero (estado excitado de vida larga).

El elemento 109 se identificó sobre la base de una única cadena de desintegración, observada a las 16,10 horas del 29 de agosto de 1982, en la reacción entre el hierro 58 y el bismuto 209. El núcleo $^{266}109$ (número atómico 109 y número másico 266) sobrevivió durante cinco milisegundos, antes de emitir una partícula alfa de 11,1 MeV; el núcleo resultante del elemento 107 se desintegró en el elemento 105 al cabo de 22 milisegundos; el elemento 105 dio lugar al elemento 104; y 12,9 segundos más tarde, el núcleo de este último elemento sufrió una fisión espontánea. El estudio de esta cadena permitió determinar la energía de desintegración, la vida media y la sección eficaz, aunque con una precisión limitada. Se observaron dos cadenas de desintegración más a principios de 1988, es decir, seis años después de la identificación del elemento 109. Estas nuevas observaciones confirmaron la interpretación del suceso estudiado en 1982.

En 1984 identificamos tres cadenas de desintegración del isótopo $^{265}108$,



posean la velocidad adecuada lo atraviesen. Los iones que no cumplen los requisitos esperados para los productos de fusión se separan del haz. El filtro SHIP reduce el número de iones pesados presentes en el haz en un factor de cien mil millones y el número de los núcleos de retroceso procedentes del blanco en un factor de mil. Por otra parte, un núcleo superpesado tiene una probabilidad mayor que dos entre cinco de alcanzar el detector (*arriba, a la derecha*).

sintetizado en la reacción entre el hierro 58 y el plomo 208. Los dos isótopos identificados de los elementos 107 y 109 son núcleos impar-impar, con una probabilidad de fisión muy reducida, pero el isótopo del elemento 108 tiene un número par de protones y un número impar de neutrones. Aunque la probabilidad de fisión de los isótopos par-impar es significativamente mayor que la de los impar-impar, el núcleo $^{265}108$ se desintegra por emisión alfa.

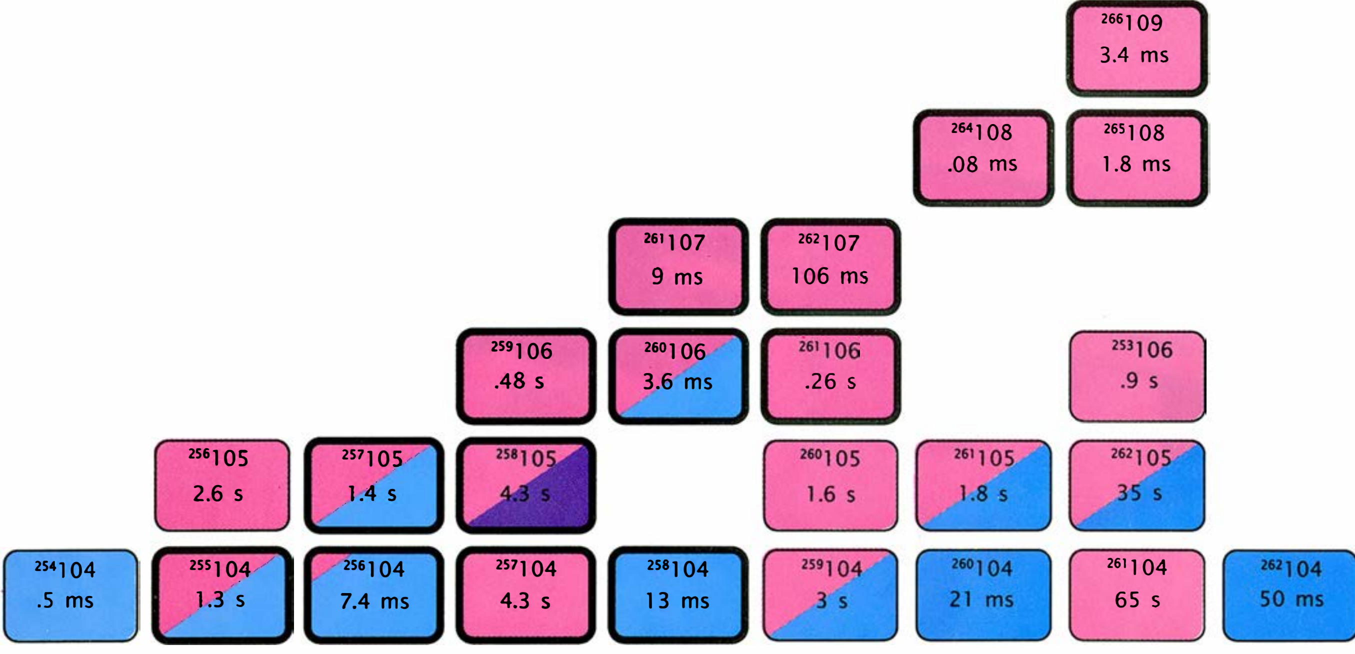
Reviste particular interés señalar que ningún isótopo de los elementos 107 al 109 sufre fisión espontánea y que todos los isótopos par-par $^{256}104$, $^{260}106$ y $^{264}108$ muestran prácticamente la misma estabilidad en relación con la fisión espontánea. Este nivel de estabilidad aproximadamente constante demuestra que los efectos de estabilización de las capas nucleares compensan la disminución general de estabilidad que tiene lugar al aumentar la masa.

Más allá de los elementos 104 y 105, existe una pequeña isla de núcleos que se desintegran por emisión alfa, para dar lugar a algunos isótopos conocidos de otros elementos más ligeros. Estas desintegraciones alfa nos permiten determinar la energía de enlace de los elementos superpesados. En cada etapa de la desintegración, si la energía de enlace del núcleo resultante de la desintegración es conocida, se puede calcular la energía de enlace del núcleo inicial a partir de la energía de la desintegración alfa. Dada una cadena de desintegraciones alfa, se puede obtener la energía de enlace del miembro inicial de la serie, si se conoce la energía de enlace del producto final. Podemos reconstruir la cadena de desintegración del $^{264}108$ al $^{260}106$, al $^{256}104$ y al $^{252}102$, gracias a la observación de un suceso para la desintegración de cada uno de los elementos 108 al 104 y de varios sucesos para el elemento 106. Las energías de enlace de estos núcleos son 120, 106 y 94 MeV, respectivamente.

La corrección de la energía de enlace por efecto de las capas aumenta de forma regular para todos los isótopos desde el uranio 232 al $^{264}108$, que estén conectados por procesos de desintegración alfa; los valores correspondientes aumentan desde 1 a 2 MeV hasta 6 a 7 MeV. De hecho, todos los elementos comprendidos entre el uranio y el elemento 108 poseen unas barreras de fisión igualmente elevadas (del orden de 6 MeV). En contraste con el uranio, que sería todavía estable si lo consideráramos una gota líquida, los elementos 106 y 108 deben por completo su estabilidad a la disposición mecánico-cuántica de sus sistemas de fermiones. El trabajo teórico realizado recientemente en este campo predice unos valores para las alturas de las barreras de fisión que coinciden con los encontrados en nuestras mediciones.

La altura de la barrera de fisión y su anchura determinan, en su mayor parte, la vida media de un elemento en relación con la fisión. Las correcciones por capas incrementan las vidas medias de los elementos 106 y 108 en 15 órdenes de magnitud. En una escala logarítmica, las vidas medias observadas se sitúan entre la "vida propia" de un núcleo (los aproximadamente 10^{-21} segundos que serían necesarios para que un conjunto no ligado de nucleones se separara entre sí) y la edad del universo (10^{18} segundos). Los nuevos elementos sólo se pueden considerar inestables en comparación con la duración de una vida humana (del orden de 2×10^9 segundos). Para resultar estables en dicha escala de tiempo, las vidas medias de estos elementos tendrían que ser mayores en 12 órdenes de magnitud. Pero la física nuclear no está basada en las escalas de tiempo de la vida humana.

La isla de actividad alfa que hemos encontrado es una consecuencia directa de la estabilización de estos isótopos por correcciones de capas. En consecuencia, la estabilización predicha, a finales de los años sesenta, para los núcleos superpesados de forma esférica que existan alrededor del elemento 114 empieza mucho antes de lo esperado y presenta un crecimiento regular. En el mínimo de inestabilidad estrecho que se observa más allá del



5. ISOTOPOS SUPERPESADOS: se distinguen de acuerdo con su resistencia a la desintegración por fisión (*color azul*). En vez de fisionarse, estos elementos se desintegran por emisión de partículas alfa (*color rojo*) o por captura electrónica (proceso en virtud del cual un protón se convierte en un neutrón, reduciendo el número atómico del núcleo en una unidad). En contraste con la tendencia general de una reducción en la estabilidad al aumentar el número atómico, la vida media del elemento 109 es mayor que la del 108. Los isótopos enmarcados con trazo grueso son los sintetizados por el grupo de los autores del artículo.

plomo, entre los elementos 83 y 90, las correcciones de capas disminuyen. Pero entre los elementos 92 y 114 las energías de corrección de capas aumentan de forma suave y regular.

Aunque la periferia de la isla de núcleos superpesados se estabiliza como consecuencia de la ordenación cuántica del sistema de fermiones, el "continente" de los correspondientes núcleos se estabiliza como resultado de las propiedades globales de las gotas líquidas. Los núcleos de los elementos 107 al 109 se sitúan en la región intermedia entre la isla y el continente. Es cuestión de mera apreciación el decidir si los nuevos isótopos pertenecen a la isla o al continente. En cualquier caso, lo mismo que sucede con los elementos superpesados, estos elementos se pueden detectar sólo gracias a la estabilización por capas de sus estados fundamentales.

Si tenemos en cuenta las últimas predicciones de la teoría de las correcciones por capas para las energías de enlace, encontramos una región de casi 400 núcleos superpesados, situados entre los elementos 106 y 126, cuyas barreras de fisión son mayores que 4 MeV. Todos estos isótopos deberían tener vida media superior al microsegundo; si pudieran sintetizarse, los detectaríamos ya con las técnicas disponibles. En las proximidades de los isótopos $^{273}109$ y $^{291}115$ cabe esperar la existencia de unas regiones de particular estabilidad. Para un número de neutrones del orden de 166, la deformación del estado fundamental cambia. Los isótopos por debajo de dicho número están deformados, en tanto que los más pesados tienen forma esférica.

Todos los intentos realizados, a lo largo de los últimos veinte años, para producir isótopos situados en el centro esperado de la estabilización del $^{298}114$ han fracasado. Ni la fusión, ni ninguna otra reacción entre iones pesados, ha conducido a la detección de estos isótopos superpesados. Sin embargo, la idea básica de posibles sistemas de nucleones estabilizados por capas, más allá de lo esperado desde el punto de vista del modelo de la gota líquida, se ha visto confirmada por los experimentos descritos en este artículo. Todo induce a pensar que la teoría se puede extrapolar para los elementos todavía más pesados.

Se plantea entonces una cuestión interesante que debemos abordar: ¿qué es lo que limita la creación de estos objetos tan frágiles? Nuestro estudio intenso de las reacciones de fusión nos han proporcionado algunas pistas importantes para resolver el problema. Los núcleos estabilizados por capas con estados fundamentales de forma esférica se pueden destruir por excitación con energías de sólo 15 MeV —fenómeno demostrado por Karl-Heinz Schmidt en 1979— en tanto que los núcleos deformados pueden sobrevivir a excitaciones de hasta 40 MeV. Incluso en el caso de la reacción entre el calcio 48 y el curio 248 —la reacción accesible más adecuada—, se encuentra una energía de excitación del orden de 30 MeV. Ello significa que sólo podemos producir elementos superpesados con núcleo deformado. Pero de todos los intentos realizados, hasta la fecha, en este sentido sólo se ha conocido el éxito en los elementos cuyo número atómico es inferior a 110.

Tal como hemos mencionado anteriormente, la fusión de dos núcleos para formar un núcleo superpesado se ve dificultada, desde el principio, por la necesidad de superar la barrera de fusión. Para un núcleo determinado, la probabilidad de superar la barrera de fusión es mínima cuando los iones más ligeros posibles bombardean los blancos más pesados. A pesar de las ventajas que esta situación presenta desde el punto de vista de la fusión, una combinación tan asimétrica presenta el inconveniente de producir un calentamiento máximo del núcleo producido, lo cual se traduce en unas pérdidas elevadas a través de procesos de fisión en la desexcitación. Cuanto menos asimétrica sea la combinación, menores serán las pérdidas en la fase de enfriamiento. El mejor compromiso entre unas pérdidas pequeñas en la etapa final y una elevada probabilidad de formación en la etapa inicial se produce en las combinaciones más simétricas con los núcleos diana en la proximidad del plomo.

La utilización del plomo y del bismuto como blancos supone un uso doble de la corrección por capas de estos núcleos: el fuerte enlace de estos núcleos con sus capas doblemente completas conduce a una reducción, en la energía suministrada al núcleo producto, de más de 10 MeV, amén de la reducción correspondiente en las pérdidas por fisión. Por otra parte, la posibilidad de superar la barrera de fusión es mayor cuando se usan, como elementos de la reacción, núcleos bastante duros, fuertemente ligados y dotados de forma esférica. En este caso se ponen de manifiesto, una vez más, los intensos efectos por capas del plomo; aunque ahora dichos efectos intervienen en la dinámica del proceso.

Estamos empezando a comprender por qué será muy difícil producir elementos más pesados. Merced a la interrelación, y sólo gracias a ella, entre las correcciones por capas en la fusión de núcleos con capas completas, los efectos de las capas en la dinámica de las reacciones de fusión y la excepcional estabilidad de los núcleos superpesados deformados por excitación, es posible crear isótopos de los elementos superpesados más ligeros. Debemos generalizar la pregunta sobre la existencia de núcleos estabilizados por capas hasta abarcar el efecto de las correcciones por capas en todas las etapas del proceso de síntesis. La introducción de una ordenación ya existente y la anulación de un desorden innecesario en la reacción de fusión constituyen dos factores esenciales para la creación de estos objetos complejos y frágiles.

¿Cómo se producirán nuevos elementos superpesados? Si se trata de los elementos 110 y 111, deberíamos poder emplear los mismos métodos que ya hemos desarrollado para las reacciones entre el níquel 62 y el plomo 208 o el bismuto 209. Una vez creados esos elementos, su detección no implicará tanto el desarrollo de nuevos métodos básicos cuanto el manejo de isótopos enriquecidos, junto con la paciencia necesaria para dominar y aplicar nuestras técnicas durante meses.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

IDENTIFICATION OF ELEMENT 107 BY α-CORRELATION CHAINS. G. Münzenberg et al. en *Zeitschrift für Physik A*, vol. 300, n.º 1, págs. 107-108; junio de 1981.

EVIDENCE FOR ELEMENT 109 FROM ONE CORRELATED DECAY SEQUENCE FOLLOWING THE FUSION OF ^{58}FE WITH ^{209}BI. G. Münzenberg et al. en *Zeitschrift für Physik A*, vol. 315, n.º 1, págs. 145-158; enero de 1984.

ON THE PRODUCTION OF HEAVY ELEMENTS BY COLD FUSION: THE ELEMENTS 106 TO 109. Peter Armbruster en *Annual Review of Nuclear and Particle Science*, vol. 35, págs. 135-194, 1985.

OBSERVATION OF THE ISOTOPES ^{264}108 AND ^{265}108. G. Münzenberg et al. en *Zeitschrift für Physik A*, vol. 328, n.º 1, págs. 49-59; septiembre de 1987.

RECENT ADVANCES IN THE DISCOVERY OF TRANSURANIUM ELEMENTS. Gottfried Münzenberg en *Reports on Progress in Physics*, vol. 51, n.º 1, págs. 57-104; enero de 1988.

Topobiología

Estudia las interacciones "dependientes del lugar", cuya manifestación más llamativa se da durante el desarrollo embrionario. Ha proporcionado, para sorpresa de todos, una valiosa información sobre el sistema inmunitario

Gerald M. Edelman

Uno de los aspectos más gratificantes de la ciencia es que resulta imposible predecir el punto exacto al que conducirá determinada línea de investigación. Una investigación prolongada puede acabar arrojando luz sobre enigmas largo ha pendientes en otro campo que, en principio, se nos antojaría muy lejano. Acaba justamente de presentarse una de estas inesperadas conexiones entre dos campos de la biología en los que he venido trabajando casi toda mi vida. Empecé con la estructura de los anticuerpos, las moléculas del sistema inmunitario encargadas de reconocer la presencia de invasores y desencadenar su destrucción. Dicho trabajo culminó en las postrimerías de la década de los sesenta con la exposición de la estructura compleja de los anticuerpos.

Después, en los primeros años del decenio siguiente, se vio ya claro que los anticuerpos debían encuadrarse con otras moléculas del sistema inmunitario en una misma entidad evolutiva: la "superfamilia de las inmunoglobulinas". Aunque se trataba de un descubrimiento muy curioso, no me intrigó como podía haberlo hecho años antes; en esa época mi interés se centraba en otro problema, el de la interactuación de las células de un embrión en desarrollo hasta formar un organismo. Esa nueva línea desembocó en el descubrimiento de las moléculas de adhesión celular (MAC), proteínas que desempeñan papel mediador en las interacciones entre las células del embrión. Una comprensión más completa de estos fenómenos, educida del análisis de las MAC y de otras moléculas con ellas emparentadas, ha permitido empezar a echar los cimientos de una embriología molecular, que relaciona la forma y función de los tejidos embrionarios con la evolución y la genética. Dedicaré la mayor parte del artículo a la descripción de estas recientes investigaciones.

Pero antes de terminarlo volveré al tema del primero de mis trabajos. Por ironía de las cosas, el descubrimiento y análisis de las MAC ha resuelto el problema, pendiente desde hace mucho, del origen evolutivo de la superfamilia de las inmunoglobulinas. Quedó demostrado, hace poco, que los genes correspondientes a las MAC y los correspondientes a las inmunoglobulinas poseen tantas secuencias proteínicas y de ADN similares, que resulta obligada su relación evolutiva. Además, las MAC gozan de amplia difusión por todo el reino animal, mientras que el sistema inmunitario adaptativo se limita a los vertebrados. Parece, pues, verosímil que las moléculas del sistema inmunitario surgieran de los genes del sistema célulo-adhesivo, lo que constituye un notable ejemplo de oportunismo evolutivo.

Anticuerpos y moléculas de adhesión celular desarrollan sus principales efectos en las superficies de las células. Las interacciones superficiales entre células pueden acarrear cambios en la expresión génica y en la morfología, movimiento y función celular. Cuáles vayan a ser exactamente las reacciones que se produzcan en la interacción entre células es cosa que depende en parte de su historia, de las interacciones que hayan tenido en el pasado con otras células. Lo que es más, dado que estas interacciones dependen de qué células rodeen a la célula considerada, las células reaccionan de modo distinto según los lugares. Tales interacciones topo-dependientes, que acontecen en el sistema inmunitario, adquieren importancia especial en el desarrollo embrionario. En efecto, la suerte que correrán las células —lo que llegarán a ser en el organismo maduro— depende crucialmente del lugar o entorno celular en el embrión.

Los embriólogos sabían, desde hacía mucho, que el lugar ocupado por la célula desempeñaba un papel crítico en la determinación de su futuro desarrollo. Mas parecía necesario replantearse la cuestión y dar nombre al estudio de aquellas interacciones acontecidas en la superficie celular que sean dependientes de la ubicación de la célula e induzcan la regulación celular. Hace cosa de dos años, el autor acuñó el término topobiología (del griego *topos*, lugar) para describir este proceso dinámico e interactivo.

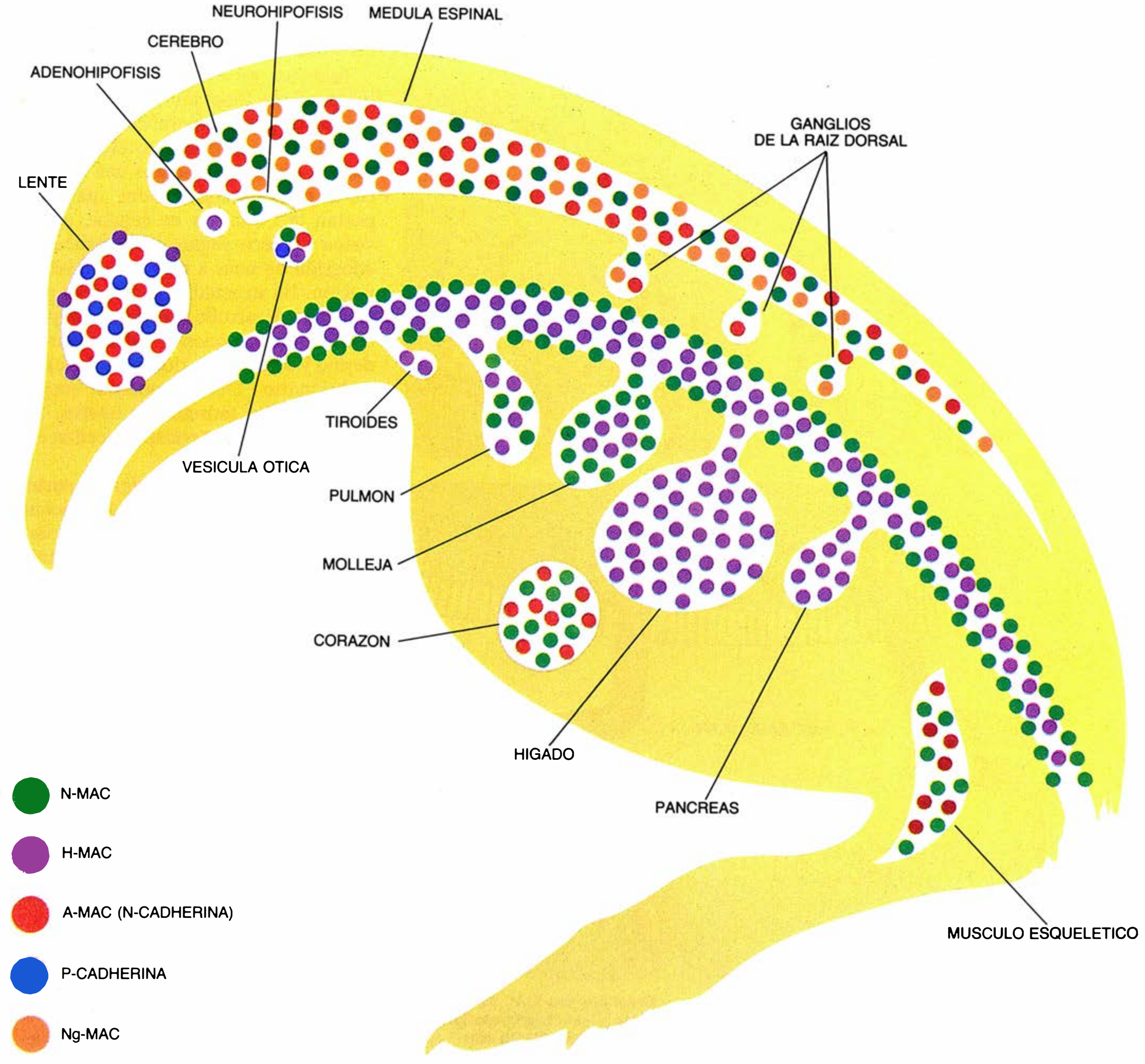
Como puso de manifiesto el descubrimiento de las MAC, uno de los factores clave que determinan la ubicación de una célula embrionaria (y, en última instancia, la forma y organización de los tejidos) es la presencia de moléculas de adhesión celular. A lo largo de estos últimos años se ha demostrado que son varias las familias moleculares que median tales adherencias, así como las consecuentes transacciones intercelulares [véase "Base molecular de la forma animal", por Gerald M. Edelman, Investigación y Ciencia, junio de 1984]. Aparte de las MAC propiamente dichas, las más importantes de las anteriores son las moléculas de adhesión al sustrato, MAS, y las moléculas de unión celular, MUC. Las MAC se encuentran siempre sobre la superficie

GERALD M. EDELMAN es titular de la cátedra Vincent Astor de la Universidad Rockefeller y director de su instituto de ciencias neurológicas. Tras licenciarse en medicina, se recibió de doctor, en 1960, en la Rockefeller (Instituto Rockefeller de Investigación Médica) con un trabajo sobre la estructura de la gammaglobulina, proteína crucial del sistema inmunológico. Hacia 1969 había logrado describir la secuencia de aminoácidos y la estructura interna de la gammaglobulina, trabajo por el que recibió el premio Nobel en fisiología y medicina en 1972. Dirigió entonces su atención hacia el problema de la morfogénesis del embrión animal. Este artículo describe la forma en que ambos campos de investigación, en apariencia independientes, tienen intersección no vacía.

de la célula y median en la interacción célula-célula; las MAS son vertidas por las células al medio circundante, formando parte de la compleja matriz extracelular a la cual se ligan ocasionalmente las células; por último, las MUC intervienen en la formación de estructuras complejas (entre las que se cuentan las uniones tensas —"tight junctions"—, las uniones de hiato —"gap junctions"— y las uniones adherentes) que unen unas a otras las células de los tejidos.

La totalidad de las MAC, MAS y MUC conocidas son proteínas complejas. Estamos empezando ya a conocer las estructuras de algunas. La atención se halla ahora puesta en cómo funcionan en el embrión cada una de estas moléculas de adherencia y en la posible interrelación de las funciones de diferentes moléculas. Ha podido establecerse que casi todas las MAC conocidas se ligan unas a otras merced a un mecanismo de homofilia: una MAC situada sobre una célula se une a otra MAC del mismo tipo situada sobre una célula yuxtapuesta. Existen, empero, diferencias entre las MAC; divergen en la especificidad de engarce y en la dependencia de los iones, por ejemplo, del ion calcio.

Uno de los temas recurrentes del desarrollo embrionario es la transición de epitelio a mesénquima, y recíprocamente. Mesénquima es el grupo de células libres o migratorias que no se ajustan a una organización estricta desde el punto de vista geométrico. El epitelio es una lámina celular sumamente organizada desde el punto de vista geométrico y, con frecuencia, unida por su base a la matriz extracelular. La unión del epitelio a la matriz se logra merced a las MAS; las células epiteliales, por su parte, suelen hallarse unidas entre sí mediante junturas compuestas por diversas MUC. Dado que la transición de una a otra forma colectiva es uno de los temas subyacentes al desarrollo, resultaría de gran valor saber cuál de estas

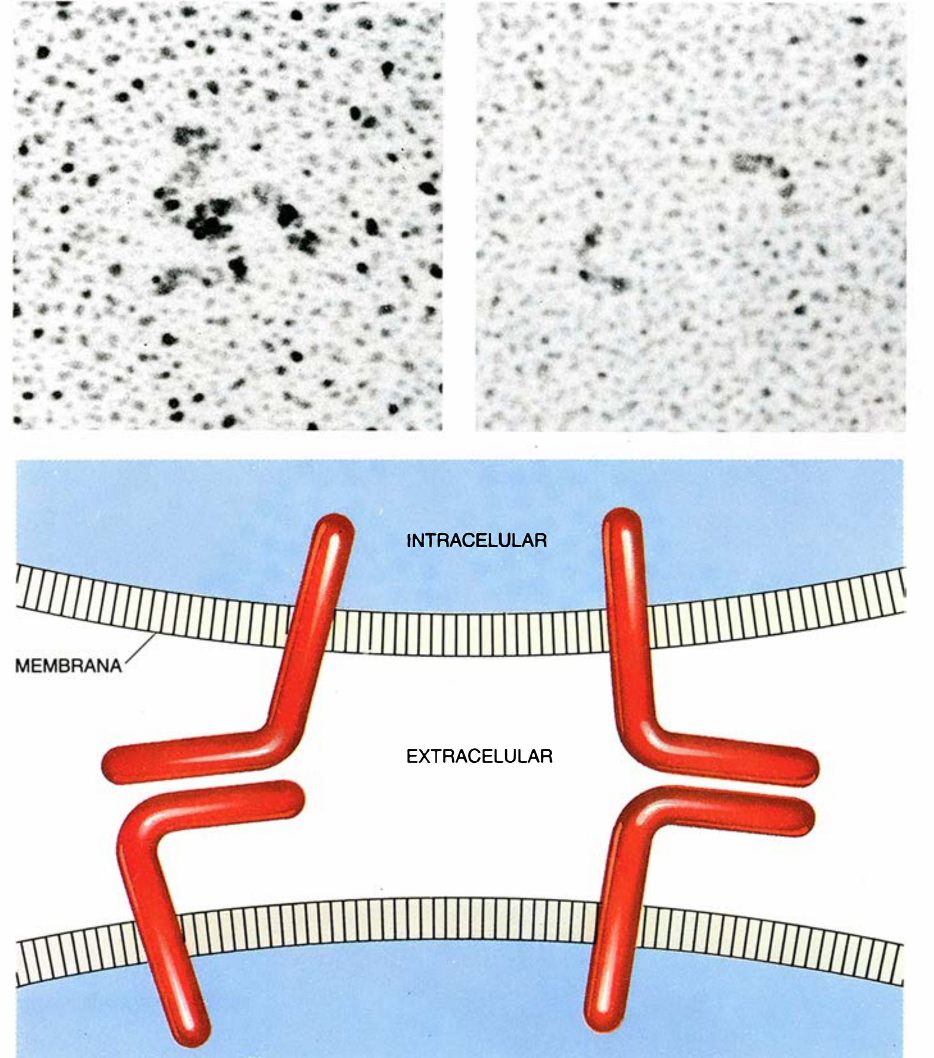


1. DISTRIBUCION DE LAS CINCO MAC (moléculas de adhesión celular) hoy conocidas en un embrión de pollo, justo antes de la eclosión del polluelo. La distribución de las MAC (cada una de las cuales tiene una distinta especificidad de unión) induce a pensar que éstas participan en la morfogénesis del embrión. Su distribución espacial varía con el tiempo. En estadios anteriores, las zonas se traslapan y cubren casi totalmente el área dibujada. (George V. Kelvin.)

moléculas es responsable de la conversión inicial de mesénquima en capa epitelial.

De acuerdo con los experimentos efectuados recientemente en mi laboratorio, cabría atribuir a las MAC el papel inicial en la trabazón de células epiteliales; esos ensayos sugieren también que la formación de las uniones de hiato y las uniones adherentes se fundan en ligaduras mediante MAC. Llegué a esos resultados insertando ADN que determinaban MAC en células cultivadas carentes de él, mediante un proceso de transferencia ("transfection"). Las MAC elegidas fueron de dos tipos, MAC neurales (N-MAC) y MAC hepáticas (H-MAC). Fueron éstas las primeras MAC descubiertas, y recibieron sus nombres de los tejidos donde fueron halladas. Se sabe hoy que su distribución en el embrión es mucho más amplia.

Antes de la transferencia de H-MAC, las células se encontraban separadas y se asemajaban a un mesénquima. Después de la transferencia del gen de H-MAC, las células se juntaron para constituir una película que poseía características de los epitelios. Después de formarse la lámina, surgieron entre las células uniones de hiato y uniones adherentes. Parece verosímil que la acción de los genes MAC provocase que las MUC existentes se ensamblasen en uniones, lo que induce a suponer que el proceso depende de las MAC. Además, la adición de fragmentos de anticuerpos contra las H-MAC, que bloquean la típica ligadura homofílica de esta molécula, produjo la disolución de las láminas celulares y una patente disminución de las uniones intercelulares.



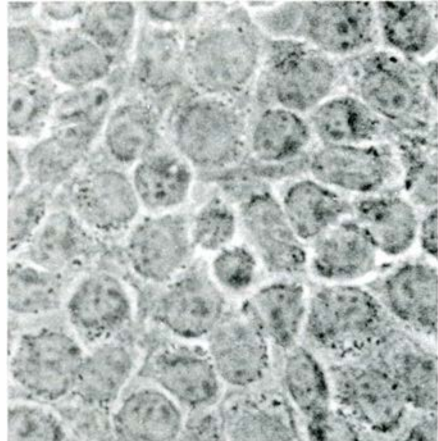
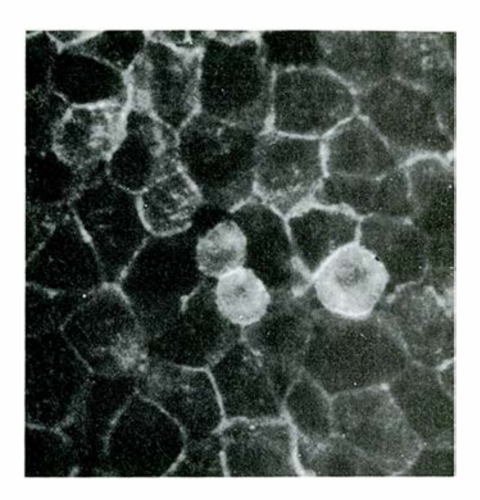
2. LAS MAC LIGAN unas células a otras mediante un mecanismo homofílico: una MAC de una célula establece un enlace con una MAC del mismo tipo de una célula yuxtapuesta (*abajo*). Las fotografías se obtuvieron sombreando MAC con platino y observándolas en el microscopio electrónico. Una de ellas (*izquierda*) permite ver tres moléculas de adhesión celular neurales (N-MAC) engarzadas por una suerte de cubo de rueda integrado por las áreas que hubieran sobresalido a través de la membrana celular externa. La otra muestra una molécula de adhesión celular hepática (H-MAC). Las MAC parecen ser moléculas lineales acodadas. Abajo se ilustran dos mecanismos de unión basados en la estructura acodada de las N-MAC.

Los resultados anteriores dan indicación de la importancia de las MAC en el desarrollo del embrión. Como ya señalé, la transición de epitelio a mesénquima y el proceso inverso constituye uno de los fenómenos fundamentales del desarrollo embrionario. Mas no el único. Entre los otros se cuentan ciertos movimientos de los tejidos y la formación de nuevas fronteras entre los mismos. Tales procesos forman parte del esquema general de la morfogénesis, esto es, la aparición en el animal de órganos y tejidos diferenciados, especializados. La importancia del papel de las MAC en estos procesos espaciales queda de manifiesto en vista de que MAC con especificidades diferentes ofrecen una distribución distinta; cada una lo hace en una pauta característica que se presenta espacial y cronológicamente en el embrión en desarrollo.

Tenemos un ejemplo excelente de los procesos topobiológicos en la formación de plumas, parte crucial del desarrollo del embrión de pollo. La formación de plumas recorre una secuencia de procesos coordinados, que comportan la traslación de células, su división y muerte según ciertas pautas, la adhesión de unas a otras y su diferenciación. En su estadio inicial, gran parte de este desarrollo coordinado depende de las interacciones entre el mesodermo y ectodermo, dos tipos de tejido embrionario. Del mesodermo surgen casi todos los músculos y huesos. La piel y el sistema nervioso proceden del ectodermo.

Volvamos al pollo. En algunas partes del embrión en desarrollo, por encima de los tejidos mesodérmicos yace una capa de tejido ectodérmico especializado, a saber, la epidermis. El primer paso en la formación de plumas es la inducción en la epidermis de yemas plumígenas, estructuras que darán luego origen a la pluma. La aparición de las yemas plumígenas exige la transmisión de una complicada combinación de señales químicas entre el mesodermo y el ectodermo en un proceso de inducción embriológica. A su vez, la eficacia de todo este sistema de señales depende de la acción de las MAC, acción que es posible estudiar transfiriendo tejidos de piel embrionaria a un cultivo de laboratorio.

Experimentos recientes llevados a cabo en mi laboratorio arrojaron luz sobre las relaciones existentes entre la unión por MAC y el sistema de señales que desemboca en la formación de yemas plumígenas. En rasgos generales, los experimentos consistieron

3. LAS MOLECULAS DE ADHESION CELULAR CAMBIAN LA FORMA de grupos de células, como vemos en las microfotografías tomadas en el laboratorio del autor. Las células cultivadas carentes del gen H-MAC adoptan formas sueltas, similares al mesénquima del embrión (*izquierda*). Cuando se inserta en las células el gen de H-MAC y se activa para que sintetice H-MAC, éstas adoptan una disposición más regular que se asemeja a los denominados epitelios (*microfotografía central*). Técnicas de fluorescencia revelan que la H-MAC se encuentra sobre la superficie de la célula (*regiones claras de la derecha*).

sustancialmente en perturbar la ligadura MAC y observar los efectos producidos sobre la compleja disposición geométrica normal de las yemas plumígenas. En el embrión en desarrollo normal, las yemas plumígenas inducidas parten del eje de simetría del embrión y se extienden en formación hexagonal hacia los lados. Tal disposición es ya reconocible en las placodas, que son las precursoras de las yemas plumígenas que formarán las estructuras de la pluma madura, así como en las condensaciones dérmicas, que son las células mesodérmicas subyacentes que proporcionan la señal inductora necesaria para la formación de las placodas en la epidermis suprayacente.

La base del experimento residía en que las células de las placodas epidérmicas estaban ensambladas mediante H-MAC y carecían, en cambio, de N-MAC. Recíprocamente, las condensaciones dérmicas se hallaban enlazadas mediante N-MAC, pero no tenían H-MAC. Supusimos que un bucle de sistema de señales, iniciado por las MAC, era necesario para un modelo adecuado de formación. En dicho bucle, las señales no sólo se moverían del mesodermo a la epidermis, sino también desde la epidermis hacia el mesodermo. Procedimos, por tanto, a introducir en el cultivo anticuerpos contrarios a la H-MAC. Tales anticuerpos sólo podrían afectar a las uniones epidérmicas y no a las de las condensaciones dérmicas. Sin embargo, la disposición de las configuraciones dérmicas también resultó modificada tras la introducción de anticuerpos en el cultivo [*véase la figura 5*].

Los resultados explicados indicaban que la modificación de las ligaduras MAC en un estrato celular podía alterar el bucle de señales que determinaba la configuración. Es posible que resulte alterada la respuesta de las células epiteliales a las señales procedentes de niveles inferiores y es posible que los mensajes descendentes emitidos por el epitelio sean los modificados; ahora bien, en uno y otro caso, el resultado es el mismo: queda interrumpida la normal formación de estructuras. Y lo que es más, el efecto es duradero. Tras efectuar el lavado de los anticuerpos y cultivar durante diez días las células perturbadas, la pauta normal de desarrollo de las plumas quedó gravemente alterada. Como estos experimentos indican, la correcta formación de estructuras depende de la correlación entre enlaces MAC y las respuestas celulares a las señales inductoras.

Dicha correlación conserva su importancia mientras se desarrolla la pluma. La pluma acabada es una estructura compleja que consta de un ástil, el raquis, del cual emanan en sentido divergente una multitud de ástiles menores, las barbas. Se hallan éstas unidas entre sí por filamentos menores: las bárbulas. El material que forma todas estas estructuras es la queratina, una proteína fibrosa que las células de la pluma depositan cuando mueren, al final del proceso de maduración. Barbas y bárbulas se desarrollan en unos filamentos a partir de unos repliegues denominados crestas barbulares [*véase la figura 4*]. Estos repliegues forman protuberancias en la superficie interior del filamento y se van hinchando progresivamente, con una línea de estricción por su base; al final se desprenden y crean estructuras cilíndricas que se interconectan. Tales cilindros son las barbas, que acabarán enlazadas y trabadas entre sí por bárbulas.

Las células de las crestas barbulares emanan de estructuras precursoras que, al principio, expresan tanto las H-MAC como las N-MAC. Sin embargo, conforme se van desarrollando las crestas, se produce una intrigante especialización, que distingue a las crestas de los valles que las separan: al madurar, las crestas llegan a expresar únicamente las H-MAC. Llegado un cierto punto, las células de los valles pierden las H-MAC, expresan sólo N-MAC y proliferan, lo que desemboca en la formación de placas marginales, regiones que festonean cada cresta. Poco después, todas las células que expresan H-MAC comienzan a sintetizar queratina y todas las que expresan N-MAC mueren. En consecuencia, los bordes o festones que separan las zonas de expresión de N-MAC y H-MAC quedan convertidas en bordes de nuevas estructuras: las barbas y las bárbulas.

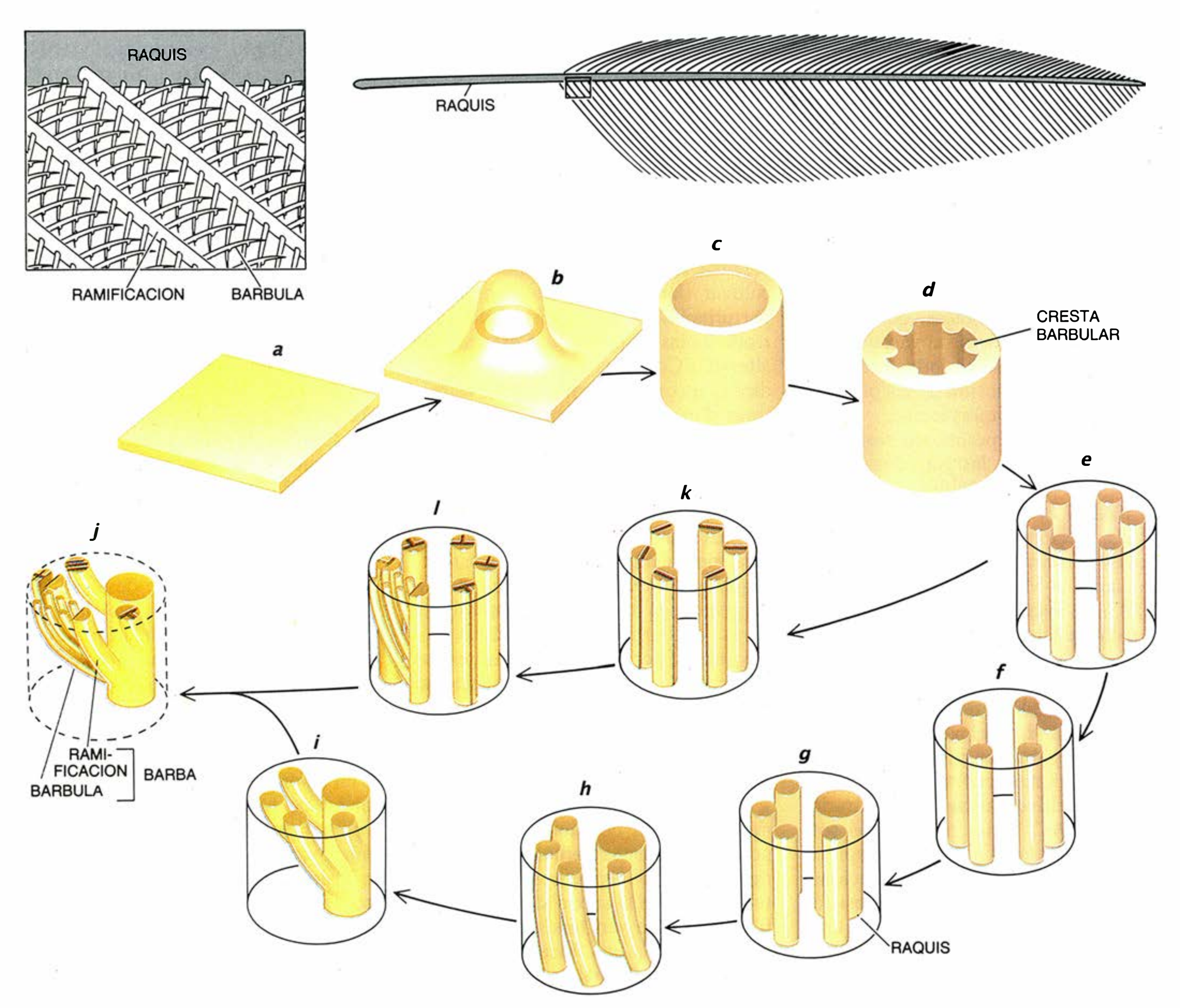
Así, pues, la expresión de MAC específicas, conjugada con la diferenciación y la muerte celular, nos lleva a la morfogénesis. Sin embargo, induciríamos a error si diéramos a entender que las MAC son las únicas moléculas con funciones morforreguladoras. Un ejemplo basado en trabajos recientes de mi laboratorio muestra de qué modo pueden las MAS influir también en los procesos de formación de estructuras embrionarias. El ejemplo concierne a un grupo de células que originan los ganglios de la raíz dorsal, haces nerviosos que se insertan en cada una de las vértebras del organismo maduro. Las vértebras propiamente dichas se desarrollan a partir de tejido mesodérmico que se agrupa en segmentos llamados somitos, cada uno de los cuales corresponde a una vértebra. Los somitos dan

lugar también a cierto número de otros tejidos; las condensaciones mesodérmicas de la pluma, por ejemplo, proceden de un mesénquima que tiene su origen en somitos. Los ganglios de la raíz dorsal se originan en células ectodérmicas que migran con carácter de mesénquima desde la cresta neural.

Para que se pueda formar la correcta disposición ganglionar, es preciso que las células de la cresta neural penetren sólo en la porción mesenquimática del somito (el esclerotomo) por su parte frontal. ¿De qué modo está guiada esta inserción? En estudios anteriores, Jean-Paul Thiery, del Centro Nacional de Investigación Científica de París, había puesto de manifiesto que las células de la cresta neural emigraban a lo largo de sendas formadas (entre otras moléculas) por fibronectina; la fibronectina es una MAS. Además, mis colegas y yo habíamos observado que otra MAS, la citotactina, aparecía distribuida según diversas pautas durante la formación del embrión. La citotactina tiene capacidad de ligarse a la fibronectina, además de a una tercera MAS conocida como proteoglicano conectador de citotactina (PGCC). Parecía interesante averiguar si la configuración periódica producida por las células de la cresta neural en su emigración hacia el esclerotomo estaba correlacionada con la distribución de las tres MAS en los somitos.

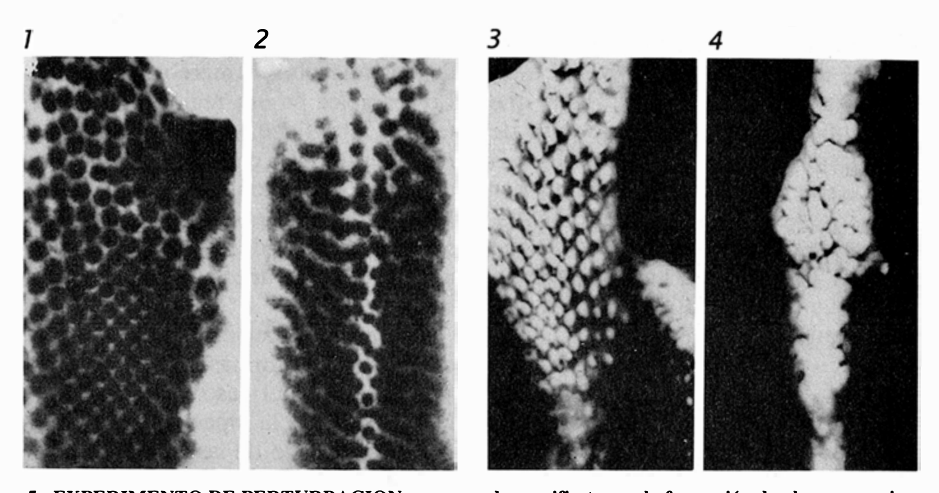
El examen de la distribución de las MAS durante la invasión de los somitos por las células de la cresta neural nos proporcionó una pista sumamente atractiva. En las fases iniciales de la embriogénesis, la citotactina, la fibronectina y el proteoglicano PGCC se hallaban distribuidos por un igual sobre toda la extensión del somito; pero al avanzar el desarrollo se hizo patente un modelo de distribución periódico: aunque la fibronectina seguía distribuida más o menos equitativamente de uno a otro extremo del somito, la citotactina prefería concentrarse en la parte frontal; más tarde, el proteoglicano PGCC se concentraba en la porción trasera. Esta distribución alternante de las MAS, que se manifestó justamente cuando las células migratorias penetraban en el esclerotomo, era resultado de moléculas sintetizadas por las células del somito y no por las células recién llegadas, procedentes de la cresta neural.

Se efectuaron experimentos independientes, encaminados a neutralizar



4. FORMACION DE LA PLUMA a partir de un precursor llamado placoda. Las células mesenquimáticas de tipo mesodérmico migran bajo una lámina epidérmica simple (*a*); constituyen un grupo que envía señales hacia arriba para inducir el desarrollo de la placoda. Se crea una protuberancia en la lámina, que forma una yema (*b*) y después un filamento consistente en un cilindro de epidermis (*c*). Se desarrollan en el cilindro resaltes, a modo de caballones, las crestas barbulares (*d*), que se subdividen hasta producir la estructura ramificada característica de la pluma madura (*e-l*). Las barbas quedan unidas por bárbulas.

los efectos de las MAS sobre la forma y el movimiento de las células. Los trabajos sobre cultivos de tejidos demostraron que la citotactina y el proteoglicano determinan que las células neurales adopten la forma un poco más redondeada, característica de las células que no están migrando. Más todavía, tales células redondeadas rehusaban migrar a regiones de tejido que contuvieran las MAS. En cambio, sobre una malla formada exclusivamente por fibronectina, las células de la cresta eran más planas y migraban con presteza, al tiempo que manifestaban una conducta intermedia sobre mezclas de fibronectina y una cualquiera de las otras dos MAS. Aunque todavía están por elucidar los detalles, la conclusión general de este trabajo es que diversas mezclas de diferentes MAS, ligadas unas a otras, crean redes que pueden tener diferentes efectos en la conducta celular y en el movimiento de las células en el embrión.



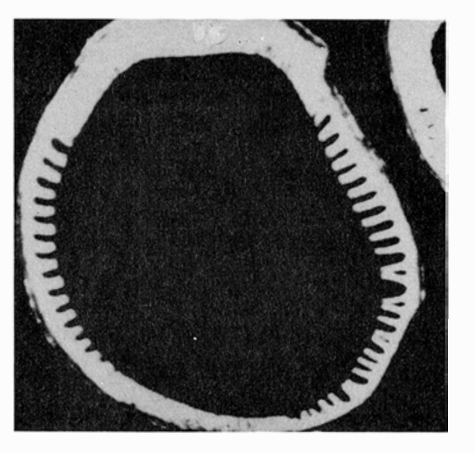
5. EXPERIMENTO DE PERTURBACION que pone de manifiesto que la formación de plumas requiere uniones MAC. Conforme se desarrolla la placoda, las células mesodérmicas situadas bajo ella adoptan una disposición simétrica en "glóbulos" (*1*) y experimentan posteriormente cambios adicionales (*3*). Si el tejido se cultiva en presencia de anticuerpos contra la H-MAC, la disposición geométrica de los "glóbulos" queda perturbada, y se producen "bandas" (*2*); más adelante, la forma general sufre una disrupción (*4*). Los anticuerpos solamente afectan a las uniones H-MAC (entre células epidérmicas), y no a las uniones N-MAC (entre células mesodérmicas). La disrupción supone un bucle de señalización entre estos tejidos.

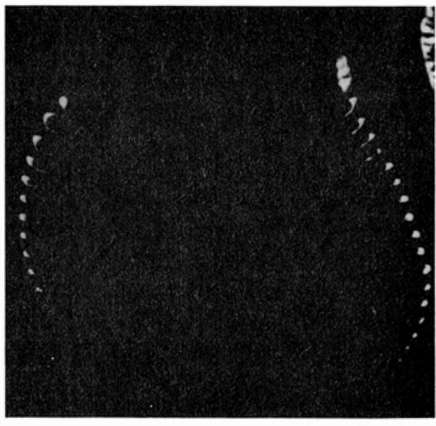
Resulta curioso que tales procesos mediados por las MAS se encuentren topobiológicamente coordinados con la expresión de las MAC. Así, las células migratorias de la cresta neural pierden al moverse N-MAC de sus superficies, pero cuando interactúan en el somito para formar los ganglios de la raíz dorsal, sus superficies vuelven a exhibir N-MAC. (De hecho, las N-MAC se hallan presentes en casi todas las células neurales en su estado maduro y plenamente diferenciado.) Resulta evidente que las MAC y las MAS están reguladas de forma coordinada durante el desarrollo y que ambos tipos de moléculas intervienen en la estructuración de los tejidos. He mencionado ya que es probable que las células queden ensambladas previamente por MAC antes de que las MUC creen uniones entre ellas; parece pues que, en general y durante el desarrollo de un organismo, existen intrincadas interdependencias entre estas tres clases de moléculas morforreguladoras.

Y no obstante, a pesar de su complejidad, estas interacciones no bastan para explicar el modo en que se desarrolla el embrión. La diferenciación de tejidos embrionarios hasta formar tejidos maduros requiere que produzcan proteínas tisulares específicas, esto es, proteínas hepáticas en el hígado, proteínas musculares en los músculos, y así por demás. Los genes que determinan estas proteínas se encuentran separados de los genes correspondientes a las moléculas de adhesión celular. Sin embargo, las acciones de estas dos clases de genes no son independientes, y he propuesto la hipótesis del morforregulador para interpretar el ciclo que los conecta.

En la hipótesis del morforregulador, las células están controladas mecánico-químicamente mediante ciclos de expresión de MAC y mediante redes de MAS. Tenemos un ejemplo de tal control en los cambios de forma y de movimiento de células de la cresta neural derivado de su unión a determinadas MAS. La expresión de los genes MAC y MAS altera la forma y la respuesta de las células ante las series de señales, pues controla la formación de conjuntos celulares que intercambian señales en un lugar dado. Por tales métodos, la expresión de los genes de MAC y MAS influye en la expresión de otros genes; entre ellos, genes historreguladores encargados de la codificación de proteínas tisulares específicas. En topobiología, es la interacción de las superficies celulares quien controla las fuerzas mecánico-químicas que guían a las células, creando conjuntos celulares cuyos sistemas de señales quedan en consecuencia alterados, lo mismo que su estado de diferenciación. Tal modulación del estado celular por las MAC y las MAS tiene forzosamente que desempeñar un papel de primer rango en la evolución de la forma animal y en el desarrollo de la estructura de los tejidos.

La hipótesis del morforregulador hizo que mis colegas y yo centrásemos nuestra atención en los genes que determinan las moléculas morforreguladoras, en particular las MAC. Bruce A. Cunningham y el autor elucidaron





6. ALTERNANCIA DE H-MAC Y N-MAC durante el desarrollo de las crestas barbulares. Cada recuadro muestra una sección transversal del folículo en desarrollo de una pluma, teñido con anticuerpos fluorescentes contra una MAC específica. La H-MAC (*izquierda*) ensambla células de cresta, mientras que la N-MAC (*derecha*) une las células de los valles que median entre las crestas. Al poco de concluir este estadio, las células con H-MAC sintetizan una proteína fibrosa, la queratina, mientras que las células con N-MAC mueren.

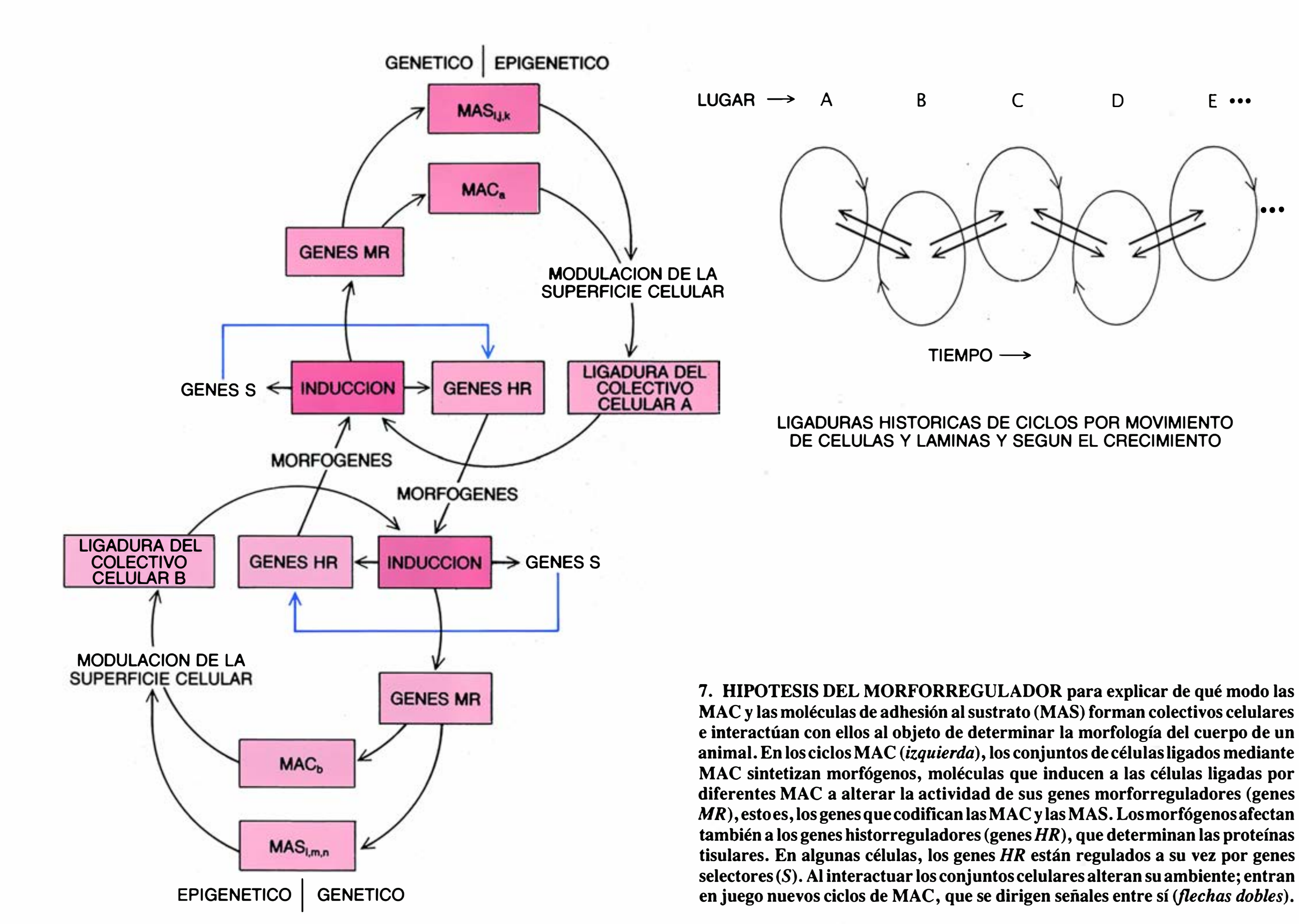
la estructura de los genes correspondientes a las N-MAC y H-MAC estableciendo las secuencias de ADN que las codifican. Nuestro trabajo puso de manifiesto que las N-MAC y las H-MAC están especificadas cada una por un solo gen y que los genes difieren sustancialmente en sus secuencias, lo que induce a pensar que estas dos moléculas no guardan una íntima relación desde el punto de vista evolutivo.

Las diferencias entre los genes de H-MAC y de N-MAC residen, en parte, en la forma en que son procesados para formular el mensaje definitivo que especifica una proteína. Casi todos los genes de los mamíferos contienen regiones codificantes, los exones, y regiones no codificantes, los intrones. Una vez transcrito el ARN a partir del gen, se eliminan las porciones no codificantes, mientras las porciones codificantes se empalman unas en otras para constituir la molécula definitiva de ARN mensajero (ARNm). En algunos casos, formas alternativas de ensamblar el ARNm pueden producir proteínas distintas. Tal acontece con la N-MAC: sus 19 (o más) exones pueden ser ensamblados de diversas formas, algunas de las cuales pueden dar lugar a MAC que se diferencian un poco en la región que liga la molécula a la membrana celular. Los cambios en esa región pueden alterar la intensidad de la unión de las N-MAC entre sí y con el citoesqueleto, que es el esqueleto interno de la célula. El gen de la H-MAC, por otra parte, aunque comprende cierto número de exones, no da pruebas de empalmes alternativos.

Es preciso hacer hincapié en que la diversidad de formas de ensamblaje apreciables en el caso del gen de N-MAC no altera la especificidad del engarce homofílico de las MAC; las moléculas de N-MAC se traban unas a otras, sea cual fuere la forma en que se han ensamblado sus genes. Tan sólo la intensidad colectiva de la ligadura resulta afectada por variantes en el ensamblaje del material genético. Así sucede porque el número y disposición de las moléculas MAC (y en consecuencia, la eficacia total de la ligadura) resultaría alterada al modificar la manera en que tales moléculas se anclan en la membrana celular. Tal disposición encaja a la perfección con la idea de que probablemente hay apenas unas pocas docenas de MAC con distinta especificidad de ligadura, que por regulación dinámica en la superficie celular mediante diversos mecanismos pueden producir una gama muy amplia de matices en la ligadura.

Ya han salido del laboratorio algunos miembros más de esta pequeña familia molecular. Al poco de que Cunningham y el autor dieran cuenta de sus resultados, otros estudios señalaban que la N-MAC se asemejaba a cierta proteína que se encuentra en los tejidos del sistema nervioso. Se sospecha ahora que esta molécula, la glicoproteína asociada a la mielina (GAM), es también una MAC. Trabajos posteriores en el ADN, efectuados por Masotoshi Takeichi y colaboradores en la Universidad de Kyoto, pusieron de manifiesto la existencia de varias moléculas más de adhesión celular, llamadas cadherinas, que son similares a la H-MAC en secuencia y estructura de ADN, pero cuya distribución en los tejidos embrionarios sigue una pauta diferente.

Aunque todos estos hallazgos relativos a la estructura genética de las MAC resultaron del mayor interés, el más llamativo de todos fue el descubrimiento de que la N-MAC compartía analogías



7. HIPOTESIS DEL MORFORREGULADOR para explicar de qué modo las MAC y las moléculas de adhesión al sustrato (MAS) forman colectivos celulares e interactúan con ellos al objeto de determinar la morfología del cuerpo de un animal. En los ciclos MAC (*izquierda*), los conjuntos de células ligados mediante MAC sintetizan morfógenos, moléculas que inducen a las células ligadas por diferentes MAC a alterar la actividad de sus genes morforreguladores (genes *MR*), esto es, los genes que codifican las MAC y las MAS. Los morfógenos afectan también a los genes historreguladores (genes *HR*), que determinan las proteínas tisulares. En algunas células, los genes *HR* están regulados a su vez por genes selectores (*S*). Al interactuar los conjuntos celulares alteran su ambiente; entran en juego nuevos ciclos de MAC, que se dirigen señales entre sí (*flechas dobles*).

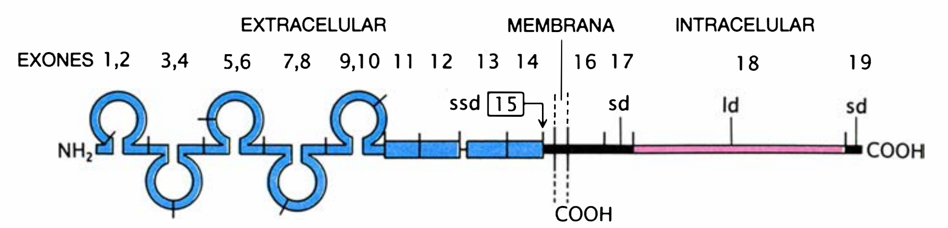
estructurales con la molécula de anticuerpo. Cuando mis colegas y yo rematamos por primera vez el análisis de la secuencia de aminoácidos de la molécula completa de un anticuerpo, en 1969, quedaron a la vista varias relaciones genéticas, estructurales y evolutivas. Relaciones que se englobaron en la "hipótesis de dominios", según la cual las inmunoglobulinas están compuestas por dos tipos de subunidades estructurales y funcionales, cada una de las cuales consta de alrededor de un centenar de aminoácidos. Estos son los dominios variables, o dominios V, que difieren de una molécula a otra dentro de una clase funcional, y las regiones constantes, llamadas regiones C, que no difieren.

La característica forma de T de la molécula de anticuerpo es resultado de un ensamblaje específico de dominios V y C. Cada anticuerpo contiene un par de cadenas denominadas "ligeras", que constan de una región constante y una variable, y de un par de cadenas "pesadas", formadas por un dominio variable y un número de dominios constantes que puede llegar a tres. En el ensamblaje conjunto, las regiones V son las responsables de enlazarse con el antígeno, mientras que las regiones C llevan a cabo las diversas funciones "efectoras", como promover la ingestión de la proteína antigénica, foránea y enlazada, por ciertas células del sistema inmunitario, los macrófagos. Curiosamente, todos los dominios de la molécula de anticuerpo, lo mismo C que V, compartían ciertas homologías de secuencia de aminoácidos; se propuso un origen evolutivo común a partir de la repetida duplicación de un gen precursor, que especificaba una región de longitud no mayor que un dominio.

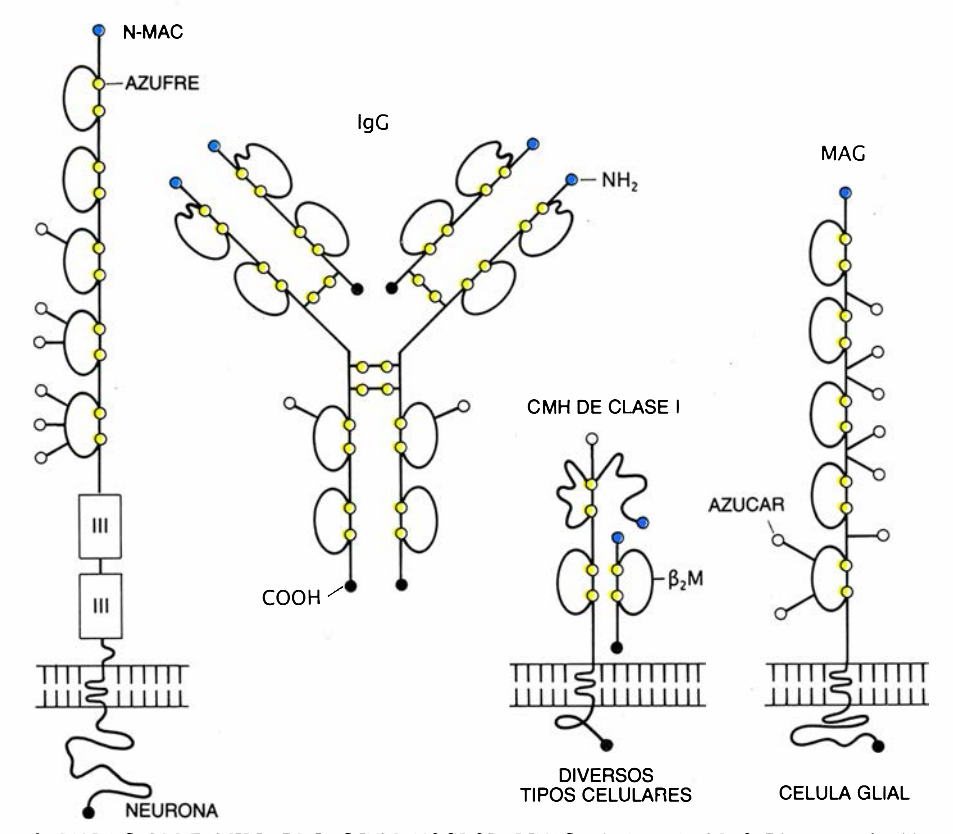
La hipótesis de los dominios ha recibido amplia confirmación desde su formulación, en 1969. De hecho, la familia evolutiva así definida se ha generalizado para dar cabida a otras moléculas; entre ellas se cuentan los receptores de los factores de crecimiento y los antígenos de histocompatibilidad que median determinadas interacciones cruciales entre células del sistema inmunitario. Este clan evolutivo ha sido bautizado "superfamilia de las inmunoglobulinas". Al tiempo que iban descubriéndose sus miembros, subsistía la cuestión de cómo había ido surgiendo grupo tan diverso.

El hallazgo del carácter homólogo de la N-MAC con estas moléculas sugería una posible respuesta a dicha cuestión. He propuesto que la totalidad del sistema adaptativo inmunitario, que se distingue por la presencia de la superfamilia de las inmunoglobulinas, nació de un sistema de adherencia celular más antiguo. El razonamiento subyacente a tal hipótesis se funda en que el sistema inmunitario adaptativo se encuentra sólo en vertebrados, lo que conlleva una tardía aparición evolutiva, mientras que el sistema de las MAC se halla mucho más extendido.

Algunas observaciones recientes respaldan vigorosamente la idea anterior. Thomas C. Kaufman y Mark Seeger, de la Universidad de Indiana, han hallado en el complejo de genes *antennapedia* de *Drosophila melanogaster*, la mosca de la fruta, una secuencia de ADN que es homóloga, en aproximadamente dos dominios y medio, de la secuencia de genes de la N-MAC; dicha secuencia especifica una proteína llamada "amalgama". Posteriormente, Corey S. Goodman y sus colegas, de la Universidad de California en Berkeley, demostraron que la secuencia de una presunta MAC denominada fasciclina II, que se encuentra en las células nerviosas de *Drosophila*, también es homóloga de la N-MAC. Las moscas de la fruta no disponen de ningún sistema similar al de inmunidad adaptativa.



8. ESTRUCTURA DE LA N-MAC deducida merced a la química de las proteínas y a la determinación de la secuencia de ADN en el gen de N-MAC. Existen diversas variedades de N-MAC, que se distinguen por el número de exones (regiones codificantes) del gen de N-MAC que hayan incorporado. Vemos aquí 19 exones; se han descubierto algunos más. Todas las variantes conocidas presentan cinco bucles ligados por enlaces 9. EN LA SUPERFAMILIA DE LAS INMUNOGLOBULINAS se incluyen las MAC. Dicha superfamilia transmembranal; *sd* cuenta con los exones 17 y 19, pero carece del 15; *ld* contiene el exón 18, no el 15.

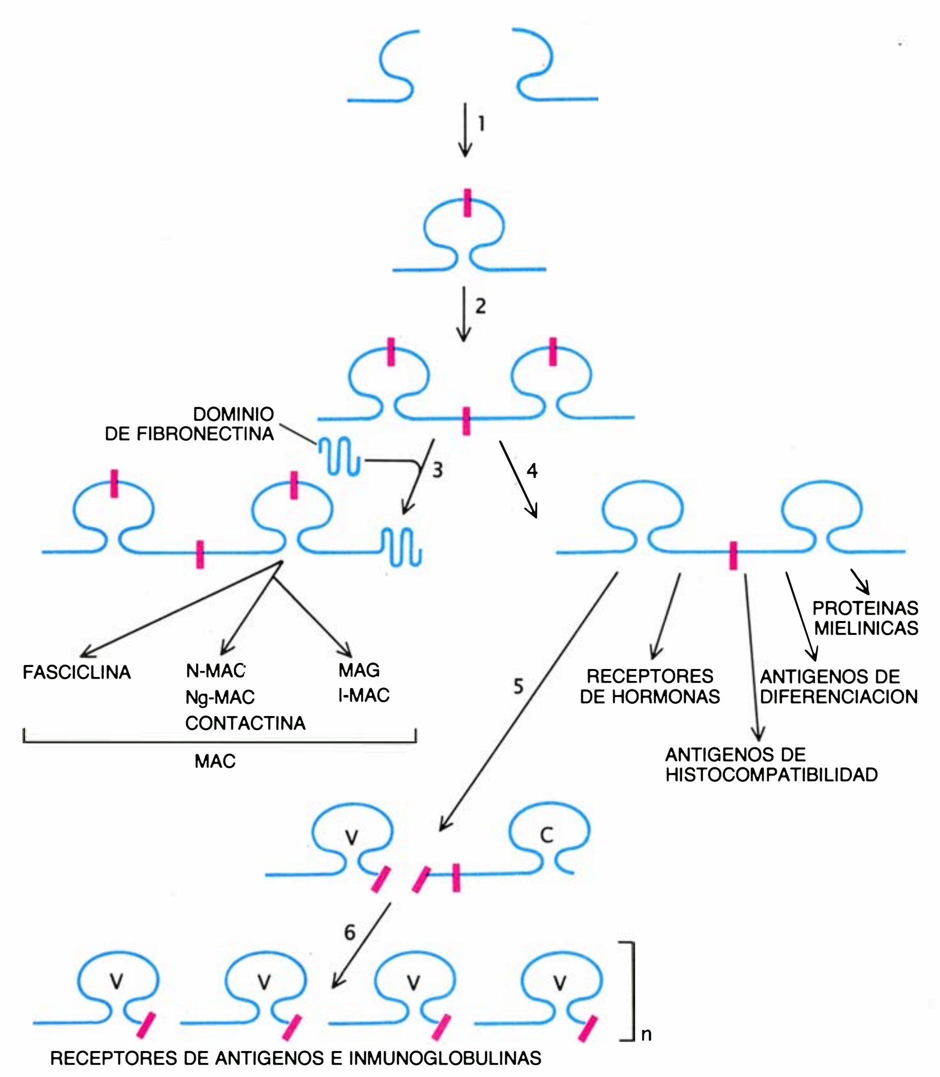


9. EN LA SUPERFAMILIA DE LAS INMUNOGLOBULINAS se incluyen las MAC. Dicha superfamilia está formada por moléculas funcional y estructuralmente diversas. Cada molécula contiene varios dominios. IgG, la molécula de anticuerpo, circula en los fluidos corporales y se une a sustancias foráneas. La clase I de las proteínas CMH, componentes de casi todas las células animales, se asocia con antígenos procesados; esas proteínas son necesarias para la eficaz presentación de antígeno a los linfocitos *T*. La pequeña cadena de las proteínas CMH, clase I, constituye un único dominio, la β_2-microglobulina. La GAM es una molécula de adhesión celular que se encuentra en las membranas de las células gliales, que son células no excitables del sistema nervioso. Las células gliales (y la GAM) participan en la mielinación de ciertas neuronas.

Dado que los insectos tienen moléculas similares a las N-MAC y puesto que los sistemas inmunitarios basados en anticuerpos sólo aparecen en vertebrados, resulta verosímil que los genes MAC, presentes en algún primitivo precursor de insectos y vertebrados, proporcionaran la base para la emergencia de las moléculas del sistema inmunitario adaptativo.

Algunos hechos más contribuyen a proporcionar un esquema de la evolución de las moléculas de adhesión celular y sus descendientes que constituye una generalización satisfactoria de la hipótesis de los dominios. A diferencia de las MAC, cada inmunoglobulina viene especificada por genes múltiples correspondientes a las regiones V y C, surgidos por duplicación de un precursor original a lo largo de la evolución; estas familias de genes duplicados muestran homologías de unas especies vertebradas a otras. Empero, se podría pensar que, a menos que estén operando mecanismos especiales, la acumulación de mutaciones independientes en diferentes genes de una tal familia duplicada destruiría la homología entre especies. ¿Cuál podría ser el mecanismo?

En 1969, mi colega Joseph A. Gally y yo propusimos que, de haber experimentado tales genes el proceso conocido por "conversión democrática de genes", las familias a las que pertenecían podrían evolucionar en paralelo entre especies. Los detalles del proceso desbordan un tanto los límites de este artículo, pero su esencia es que los genes de la familia se recombinan unos con otros de un modo particular que posibilita tal coevolución. Más todavía, las familias pueden actuar como auténticas "redes de mutación" que difundan entre sus miembros las mutaciones favorables. Dado que una mutación favorable para el sistema inmunitario adaptativo de una especie puede muy bien resultar favorable para el de otra, dichas redes, combinadas con la presión impuesta por la selección natural, podrían preservar también las homologías de las familias de genes de inmunoglobulina. Esta idea, que ya es importante en lo que a anticuerpos se refiere, reviste carácter general y es aplicable a la evolución de todas las familias multigénicas.



10. ESQUEMA EVOLUTIVO que muestra cómo surgió el sistema inmunitario adaptativo a partir de las primitivas MAC. Los exones que determinaban dos "semidominios" se combinaron para formar el gen correspondiente a un dominio individual: una unidad funcional de una proteína (*1*). Por duplicación génica se originó el gen correspondiente a una proteína multidominio, una N-MAC primitiva (*2*). La combinación de exones ("exon shuffling") unió un dominio fibronectinimorfo a los correspondientes a la familia N-MAC (*3*). La duplicación de genes y el fenómeno de divergencia originaron una multitud de MAC. Otros genes perdieron los intrones (tramos no codificantes de ADN) situados dentro de los dominios, pero no los comprendidos entre dominios (*4*). La divergencia subsiguiente en ese grupo dio origen a otros miembros de la superfamilia de la inmunoglobulina. La inserción de un elemento genético (procedente, tal vez, de un virus) creó el potencial para la diversificación de las proteínas en linfocitos diferentes (*5*). Paralelamente a este cambio, se incrementó el número de regiones variables (*V*), que proporcionó la base para la generación de una copiosa población de receptores de antígeno y de anticuerpos durante la vida de un individuo (*6*).

Acaba de demostrarse la colaboración funcional de MAC y anticuerpos en el sistema inmunitario con la observación de que diversos linfocitos —que se cuentan entre las células efectoras más importantes del sistema inmunitario— precisan de adhesión para llevar a cabo sus cometidos. Timothy A. Springer, de la Facultad de Medicina de Harvard, ha descubierto en distintas células una molécula llamada I-MAC. La I-MAC es homóloga de la N-MAC, y Springer ha demostrado que se liga a una molécula conocida por LFA-1, que se encuentra en los linfocitos. La LFA-1 se parece a las moléculas de la superficie celular denominadas integrinas, que sirven como receptores de las MAS.

Al combinar en un esquema general toda la información anterior, sale a la luz un ejemplo magnífico de oportunismo evolutivo. Su punto de partida es un tramo de ADN cuyo tamaño es aproximadamente la mitad de un dominio de N-MAC. El análisis de la estructura del gen de N-MAC revela que este precursor de tamaño mitad de un dominio fue duplicado y originó genes N-MACmorfos en los antepasados de insectos y vertebrados. Después, por variadas combinaciones en el ensamblaje de exones, se introdujeron regiones de ADN muy parecidas a MAS, tales como la fibronectina. Se duplicó luego el propio gen correspondiente a moléculas de adhesión N-MACmorfas, dando origen así a todas las demás MAC de la misma familia, entre ellas,

las que se encuentran en el sistema nervioso central, como las GAM.

Todas estas moléculas se emplearon topobiológicamente en la morfogénesis. Pero en algún vertebrado primitivo (o en un precursor inmediato), uno de los genes de esta familia cumplió una misión enteramente distinta. Por duplicación de una pieza MACmorfa de ADN surgieron las regiones V y C de los genes de inmunoglobulina, receptores de la superficie de ciertos linfocitos y antígenos de histocompatibilidad. A partir de ahí, los genes correspondientes a las regiones V se duplicaron con la frecuencia suficiente como para generar familias que se conservaron similares por conversión democrática de genes. Acontecimientos de conversión similares tuvieron lugar en la familia de histocompatibilidad. Surgieron moléculas de adhesión celular como la I-MAC destinadas a servir de puntos de anclaje para la LFA-1, una molécula receptora de la superficie del linfocito, que siguió una línea evolutiva independiente.

Así, pues, las funciones clave del sistema inmunitario adaptativo surgieron de un sistema de adhesión celular primitivo, que operaba topobiológicamente para regular los movimientos celulares y las estructuras tisulares que originan la forma animal. Aunque los linfocitos no están dedicados a definir la forma, sus funciones sí se basan en interacciones intercelulares intrincadamente reguladas. Tal regulación depende, a su vez, de mecanismos específicos de unión que probablemente se remontan hasta los orígenes que el sistema inmunitario adaptativo hubo de tener en la adhesión celular. Podemos observar un tipo específico de repliegues en la totalidad de los *loci* de ligadura de las inmunoglobulinas y, probablemente, también en todos los de las MAC. Este tipo de repliegues se llaman plisados tipo β; dos láminas forman una especie de emparedado especial en el dominio de la inmunoglobulina. La lámina β-plisada puede constituir parte de un antiguo "lenguaje" de regulación y ensamblaje celular que el sistema inmunitario adaptativo ha heredado de sus antepasados MACmorfos.

Suele considerarse que la interacción entre anticuerpo y antígeno, que puede obtenerse en el tubo de ensayo en un medio fluido, sin importar las posiciones relativas, es emblemática de todo el sistema inmunitario. No debe olvidarse, empero, que el sistema inmunitario posee tejidos sólidos (como los nódulos linfáticos), así como tejidos fluidos (como la sangre). Incluso entre los linfocitos libres y en circulación existen poblaciones que "apuntan" hacia tejidos corporales concretos. Aunque es posible generar en el tubo de ensayo respuestas inmunitarias de células aisladas, resulta verosímil que la posición desempeñe en la respuesta inmulógica global un papel tan crítico como tiene en la morfogénesis. De hecho, el análisis de las moléculas morforreguladoras y de las inmunoglobulinas muestra que estos dos sistemas guardan una estrecha relación genética y evolutiva.

Tal vez no esté fuera de lugar añadir unas pocas palabras sobre las sendas que ha tomado la investigación. La línea argumental que relaciona las moléculas del sistema inmunitario con las MAC no hubiera sido posible en un campo definido de especialización científica. Fue preciso perseguir un vago barrunto a través de una prolongada senda de investigación (sobre las MAC) hasta alcanzar la solución de un problema (los orígenes de las inmunoglobulinas) que se planteó al final de otra vía de investigación anterior, en principio desconectada. Tal línea de pensamiento se hubiera visto muy empobrecida de haberse ceñido a los estrechos límites de una especialidad, como la inmunología o la embriología. Unicamente al contemplar la biología desde sus perspectivas más amplias, evolutivas, genéticas y de teoría del desarrollo, al tiempo que se realiza investigación especializada, resulta posible interconectar materias a primera vista autónomas y formar con ellas un todo orgánico y articulado.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

ARRANGEMENT AND EVOLUTION OF EUKARYOTIC GENES. G. M. Edelman y J. A. Gally en *The Neurosciences*, editado por Francis O. Schmitt. The Rockefeller University Press, 1970.

ASYMMETRIC EXPRESSION IN SOMITES OF CYTOTACTIN AND ITS PROTEOGLYCAN LIGAND IS CORRELATED WITH NEURAL CREST CELL DISTRIBUTION. Seong-Seng Tan, Kathryn L. Crossin, Stanley Hoffman y Gerald M. Edelman en *Proceedings of the National Academy of Sciences of th United States of America*, vol. 84, n.º 22, págs. 7977-7981; noviembre de 1987.

CAMs AND IGS: CELL ADHESION AND THE EVOLUTIONARY ORIGINS OF IMMUNITY. Gerald M. Edelman en *Immunological Reviews*, n.º 100, págs. 11-45; diciembre de 1987.

TOPOBIOLOGY: AN INTRODUCTION TO MOLECULAR EMBRYOLOGY. Gerald M. Edelman, Basic Books, Inc., 1988.

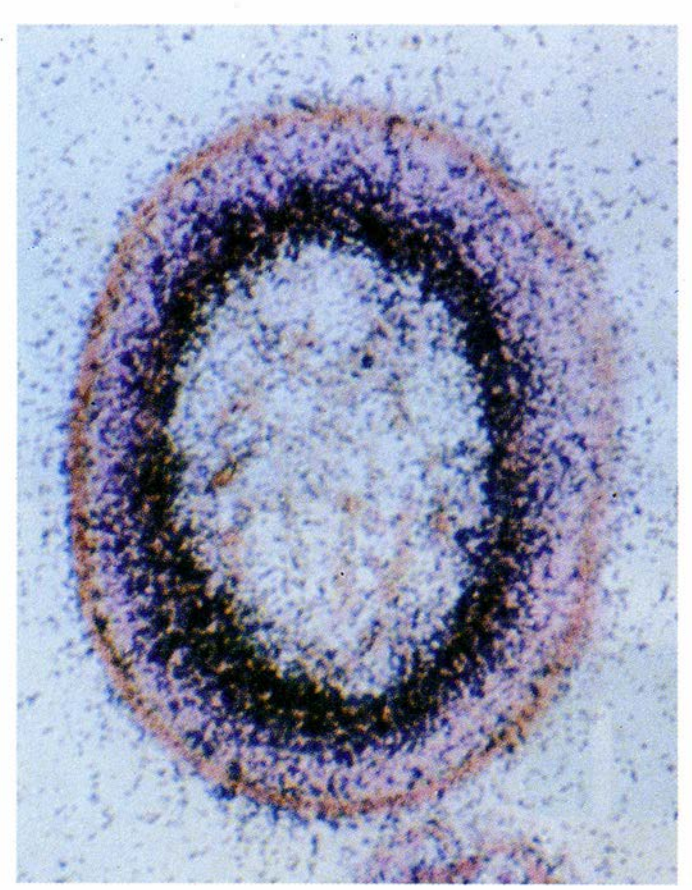
Ciencia y sociedad

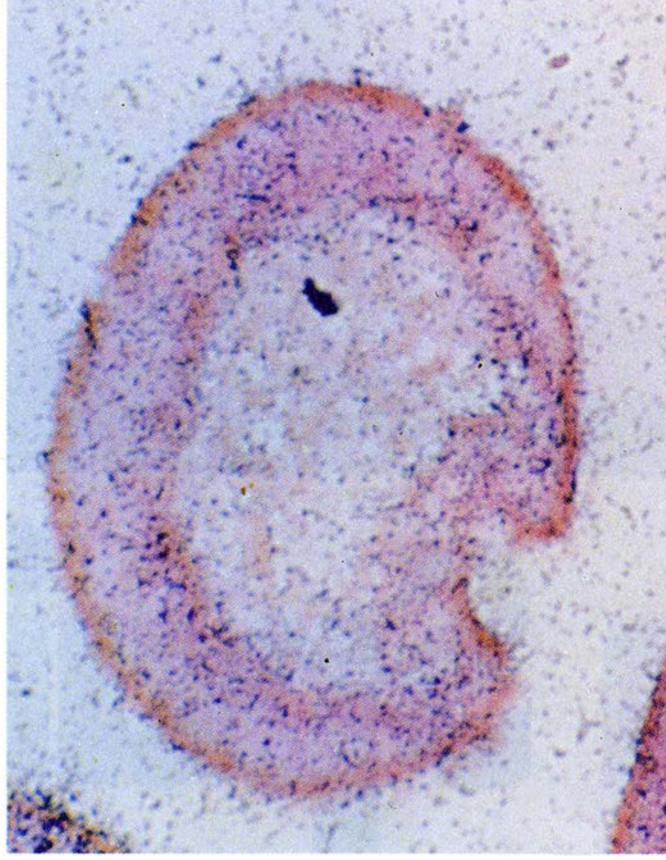
Degradación del ARNm

En los organismos superiores, la tasa de síntesis de proteínas es aproximadamente proporcional a la cantidad de ARNm presente en el citoplasma. Dicho de otro modo: para las proteínas mayoritarias existen muchas copias de las moléculas de ARNm correspondientes y, pocas, para las proteínas que escasean. Los factores que controlan la cuantía de ARNm desempañen un papel fundamental en la regulación de los niveles de proteínas celulares. Diez años atrás, se seguía postulando todavía que la cantidad de ARNm, y por tanto de proteína, presente en una célula era consecuencia directa de su tasa de síntesis. Esto es, mientras más se necesitaba cierto ARNm (proteína), más se debía fabricar. Pero con el avance de la investigación ha ido cobrando protagonismo la idea de la tasa de *recambio* del ARNm, que participaría de forma decisiva. Así, la producción de proteínas no sólo reflejaría la velocidad de síntesis de los moldes a traducir (ARNm), sino también su tasa de degradación.

La regulación de la degradación del ARNm ofrece grandes ventajas desde el punto de vista biológico. Sea el caso, por ejemplo, de las células de la médula ósea que, tras un proceso de diferenciación, se especializan en la producción de hemoglobina, molécula encargada del transporte de oxígeno. El 95 por ciento de la proteína total de las células diferenciadas, los glóbulos rojos, es hemoglobina. ¿Qué pasa con las demás proteínas? ¿Dejan de fabricarlas sus ARNm? Si así fuese, los ARNm que tuviesen una vida media larga estarían sintetizando proteínas innecesarias durante un período de tiempo más o menos dilatado. Para evitar que así sea, las células utilizan una doble estrategia, según han puesto de manifiesto los estudios de Haim Aviv y George Brawerman. Además de detener la síntesis de los ARNm innecesarios, las células precursoras eliminan, degradándolos, la mayoría de los ARNm que ya no se van a necesitar. Este doble mecanismo de actuación constituye, sin duda, una forma óptima de regular la síntesis de proteínas.

Los principales agentes implicados en la destrucción de los ARNm son las ribonucleasas citoplasmáticas, enzimas que degradan ARN. No es mucho lo que se sabe sobre las ribonucleasas. La mayoría de las células tienen unas diez o más ribonucleasas distintas. Por el momento, no nos es posible discriminar entre las que degradan ARNm y las que degradan otros tipos de moléculas de ARN. Tampoco se sabe si dichas ribonucleasas son específicas para cada ARNm o si actúan conjuntamente. La





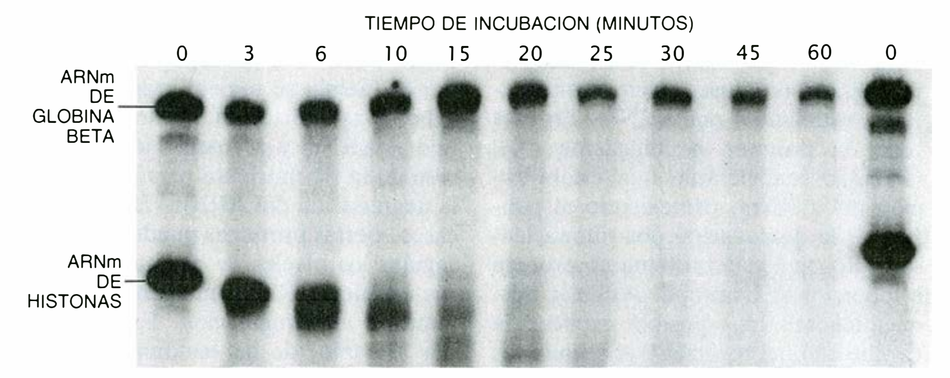
1. LAS MOLECULAS DE ARN mensajero (ARNm) que determinan la proteína abl *de* Drosophila *abundan en el estado de blástula del embrión de la mosca de la fruta* Drosophila melanogaster *(*izquierda*), según revela el marcado radiactivo (*puntos negros*). En un embrión sólo 30 minutos más viejo (*derecha*), en el estado de gástrula, esos ARNm son escasos, indicio de que los embriones de la mosca degradan rápidamente los ARNm de la proteína* abl *en un estadio precoz del desarrollo. Como la tasa de síntesis de una proteína suele ser proporcional a la cantidad de su correspondiente ARNm, la eliminación de ARNm específicos puede convertirse en una vía rápida para la alteración celular de su composición proteínica. Entre los factores que regulan la tasa de degradación de los ARNm pueden encontrarse hormonas, factores celulares de crecimiento y virus. Las micrografías son de F. Michael Hoffmann, del laboratorio McArdle para la investigación del cáncer, de la Universidad de Wisconsin en Madison.*

aplicación de la nueva técnica de los sistemas *in vitro* puede ayudar a entender su mecanismo de acción. Se puede estudiar la degradación de los ARNm en un tubo de ensayo, en un medio que contenga polirribosomas.

El grupo de Jeffrey Ross, de la Universidad de Wisconsin en Madison, purificó polirribosomas mediante centrifugación diferencial del lisado celular. Asociadas a los polirribosomas se obtenían también ribonucleasas. A partir de este complejo ribonucleasas-polirribosomas es fácil purificar las ribonucleasas y estudiar, en los sistemas *in vitro*, qué tipos de ARNm degrada y qué factores intervienen de una u otra manera en el proceso. Mediante esa técnica, Robert A. Kratzke, del equipo de Ross, purificó y estudió la ribonucleasa específica que interviene en la degradación de los ARNm de las histonas, un grupo de proteínas estructurales que se unen al ADN en el núcleo celular. La adición de dichas ribonucleasas a un medio de reacción *in vitro* con ARNm histónicos reproduce exactamente el mismo patrón de degradación que se observa *in vivo*.

Entre los factores que influyen en la tasa de degradación de los ARNm por las ribonucleasas citoplasmáticas está la propia estructura del ARNm. La molécula de ARNm, cuyo tamaño es bastante variable, consta de cuatro regiones distintas. Una de ellas, quizá la más importante, es la que contiene la información para la síntesis de la proteína (región informativa). A ambos lados de esta región (extremos 5′ y 3′ o izquierda y derecha, respectivamente, según una convención establecida), se sitúan regiones que no se traducirán en proteína (regiones no informativas). Por último, en el extremo 3′ de la molécula es normal encontrar una "cola" de aproximadamente 200 nucleótidos de adenina (poli-(A)).

Las cuatro regiones pueden afectar a la tasa de degradación del ARNm. En el caso de la región no informativa de la izquierda (5′), por ejemplo, hay una interesante serie de experimentos con el gen c-*myc* que así lo ponen de manifiesto. Este gen es un proto-oncogén, esto es, un gen que determina una proteína que, en condiciones normales, colabora en la replicación celular, pero que, si se altera o produce en exceso, puede transformar la célula en cancerosa. Según han demostrado Christian Dani, Philippe Jeanteur y sus colegas, de la Universidad de Montpellier, el ARNm transcrito a partir de un gen c-*myc* normal es relativamente inestable, con una vida media aproximada de 10 minutos. Marc Piechaczyk, Jean-Marie Blanchard y Jeanteur, en Montpellier, y Kenneth B. Marcu, de la Universidad estatal de Nueva York en Stony Brook, encontraron, de forma independiente, que los ARNm transcritos a partir de un gen c-*myc* mutado, procedente de células cancerosas de nódulos linfáticos, estaban truncados: carecían de la región no informativa izquierda (5′). La proteína resultante era normal, pero la vida media del ARNm truncado era más larga; la estabilidad del ARNm triplicaba o quintuplicaba la del ARNm normal.



2. DEGRADACION de dos tipos de ARNm en un ensayo in vitro, *y su seguimiento por electroforesis. Los ARNm se incubaron con ribonucleasas procedentes de un extracto de células lisadas. Antes de la incubación (*tiempo cero*), y tras sucesivos períodos de incubación, se separaron los ARNm por tamaños mediante electroforesis en gel. La posición de cada banda indica el número de nucleótidos que quedan (las moléculas más cortas avanzan a mayor velocidad en el gel, en la figura de arriba abajo), y la intensidad de cada mancha indica la cantidad de ARNm que queda. La práctica desaparición del ARNm de histonas tras 20 minutos indica que su tasa de degradación era superior a la del ARNm de la globina beta. Con el paso del tiempo, el ARNm de histonas migra cada vez más abajo, en virtud del acortamiento gradual de la molécula por acción de una ribonucleasa. El mismo patrón de inestabilidad de ARNm histónico y de estabilidad del de la globina se observa en células intactas, lo que confirma la validez de los sistemas* in vitro *para los estudios de degradación de ARNm.*

Este alargamiento de la vida media del ARNm pudo haber inducido que las células de los nódulos linfáticos produjeran un exceso de proteína c-*myc*, se replicaran anormalmente y se convirtieran en cancerosas. No está claro, sin embargo, el mecanismo mediante el cual la región no informativa 5′ afecta a la vida media del ARNm de c-*myc*.

Experimentos similares demuestran que una alteración de la longitud de la región informativa del ARNm para proteínas histónicas, además de originar moléculas de histonas anormales, provoca una prolongación de la vida media del ARNm. En este caso, es el tamaño de la región informativa el que, sin que sepamos cómo, afecta a la tasa de degradación. Se apunta como hipótesis la posibilidad de que una ribonucleasa reconozca si el ARNm está o no en un "contexto polirribosómico" normal, esto es, si los polirribosomas se hallan unidos al ARNm en número y posiciones normales. En caso contrario, la ribonucleasa no reconocería a "su" ARNm, y se alteraría el proceso normal de degradación. También ignoramos de qué manera la ribonucleasa podría llevar a cabo este reconocimiento.

La construcción de genes híbridos o quiméricos, con regiones 3′ no informativas de orígenes diversos, ha puesto de manifiesto que la tasa de degradación de ciertos ARNm depende de dicha región 3′. Shaw y Kamen han observado que la estabilidad de algunos ARNm depende del porcentaje de nucleótidos de adenina y uracilo presente en el extremo 3′, siendo más alta la tasa de degradación (vida media más corta) en los casos en los que hay un mayor porcentaje de tales nucleótidos. De hecho, se ha encontrado una secuencia específica de adeninas y uracilos en el extremo 3′ de muchos ARNm de corta vida media.

La "cola" de poli-(A) participa también en la estabilidad de muchos ARNm. Georges Huez, de la Universidad Libre de Bruselas, y Uri Nudel, del Instituto Weizmann, junto con sus colaboradores, han comprobado que la eliminación de la cola de poli-(A) de algunos mensajeros de vida media larga (unas 60 horas) recorta considerablemente su estabilidad hasta unas 4-6 horas, lo que sugiere que la cola de poli-(A) debe eliminarse antes de comenzar el proceso de degradación del ARNm.

Mas, según parece, no es la propia secuencia de poli-(A), sino un complejo poli-(A)-proteína lo que determinaría la estabilidad del ARNm. En este caso, la proteína polienlazante (A), (PPEA), coadyuvaría a la estabilización del ARNm, protegiendo al poli-(A) de la degradación por ribonucleasas. ¿Por qué esta proteína no protege a todos los ARNm-poli-(A) de la misma manera? Una posible explicación estriba en que los otros tres segmentos del ARNm influyen en el grado de unión de PPEA al poli-(A) y, por tanto, determinan la eficacia de protección del ARNm contra los ataques de las ribonucleasas.

Quedan muchas cuestiones por resolver antes de poder proponer un modelo general que explique el mecanismo en cuya virtud la célula regula la tasa de degradación (y, por tanto, de recambio) de los ARNm. Se admite, sin embargo, que el conocimiento de la estructura tridimensional de los ARNm con y sin polirribosomas ayudaría a despejar muchos interrogantes, amén de revelar la razón por la que moléculas de ARNm diferentes poseen tasas de degradación distintas.

Para hacernos una idea cabal del mecanismo de regulación de la degradación de los ARNm es necesario estudiar también los factores extrínsecos que directa o indirectamente intervienen en dicho proceso. Se han identificado ya algunos de estos factores; entre ellos encontramos virus y hormonas. Un virus que condiciona, de forma notable, la tasa de degradación del ARNm es el herpes simplex, causante del herpes labial y de ciertas infecciones del aparato genital. Lo mismo que otros virus, éste del herpes se apodera de la maquinaria de síntesis de proteínas de las células infectadas para encauzarla en su propio beneficio: replicarse. Michael L. Fenwick, de la Universidad de Oxford, Yutaka Nishioka y Saul J. Silverstein, de Columbia, y Niza Frenkel, G. Sullivan Read y Ann D. Kwong, de la Universidad de Chicago, han demostrado que esa usurpación se lleva a cabo mediante un procedimiento indirecto, aunque eficaz, acelerando la degradación de casi todos los ARNm celulares, incluso los que suelen ser muy estables. De esa forma, los polirribosomas quedan libres para traducir los propios mensajeros víricos.

Citemos ahora una de las hormonas que influye en la tasa de degradación de los ARNm: el estrógeno. Esta hormona sexual estimula en anfibios la producción de vitelogenina, proteína que se fabrica en el hígado. Actúa incrementando la tasa de síntesis del ARNm para vitelogenina y su estabilización. Según se sugiere, para llevar a cabo la estabilización, la hormona se une al ARNm y se interpone en la acción de la ribonucleasa responsable de la degradación del ARNm. En algunos casos, ciertas proteínas pueden llegar a regular los niveles de acumulación de sus propios ARNm, mediante un sistema de autorregulación. En el caso, por ejemplo, de las histonas, la concentración de ARNm para histonas coincide con la fase de replicación del ADN, justo cuando se requiere gran cantidad de histonas para unirse al nuevo ADN. Una vez terminada esa fase del ciclo, se acelera el proceso de degradación de los ARNm histónicos. Se cree que las propias histonas inducen la degradación de sus ARNm, cuando se encuentran en exceso, en su forma libre no asociada al ADN.

Peltz y Ross, utilizando sistemas *in vitro*, han comprobado que la adición de histonas libres a una mezcla con polirribosomas y ARNm histónicos cuadruplica el ritmo de degradación de los ARNm histónicos. El efecto es específico, ya que no se observa cuando se añaden las histonas a otros ARNm, ni tampoco cuando, en vez de histonas, se agregan otras proteínas al sistema con ARNm histónicos.

Como conclusión, cabe decir que se han identificado algunos de los factores que influyen en la tasa de degradación de los ARNm, aunque en la mayoría de los casos se desconocen los mecanismos de acción. ¿Qué tipos de moléculas transmiten las señales enviadas por los factores externos (hormonas, etcétera) y cómo actúan esos intermediarios sobre las propias moléculas de ARNm o sobre las ribonucleasas? ¿Cuántas enzimas se necesitan para degradar cada ARNm? Estas son algunas de las preguntas que se plantean ahora los investigadores. Una vez resueltas, se podrán explorar nuevas vías que permitan modificar el crecimiento y metabolismo de determinados tipos celulares, alterando la tasa de degradación de los ARNm seleccionados, primero en el laboratorio y después en organismos vivos. Incluso podemos pensar en la terapia de algunas de las enfermedades más crueles de nuestro tiempo. Cabe imaginar, por ejemplo, que ciertas infecciones víricas se traten algún día con agentes que impidan que los virus degraden los ARNm celulares. O que se pueda encontrar una vía para desestabilizar los ARNm transcritos por determinados oncogenes, detener así la proliferación anormal de las células y frenar o interrumpir definitivamente el desarrollo de procesos cancerosos.

¿Vuelve la carrera de armamentos?

Cuatro años después de que el Congreso de los Estados Unidos prohibiera las armas antisatélite, los expertos del Pentágono discuten de nuevo su desarrollo. Esta situación se hizo patente en el simposio organizado en Colorado Springs por la Fundación Espacial Norteamericana, grupo privado dedicado a promover misiones espaciales. En el simposio, representantes oficiales de los tres ejércitos manifestaron que las armas antisatélite, ASAT, eran vitales para el futuro militar. En la sala de exposiciones veíanse potentes láseres y cohetes interceptores diseñados en el marco de la Iniciativa de Defensa Estratégica (IDE), que podrían utilizarse como ASAT.

El Pentágono mantiene que la Unión Soviética hace tiempo que está desarrollando armas de este tipo. En 1968, los rusos experimentaron con un ingenio orbital ASAT que, una vez puesto en órbita, dirigíase mediante unos pequeños cohetes hacia su objetivo y explotaba junto al mismo, destruyéndolo. En respuesta, los norteamericanos desarrollaron un misil con un detector térmico que, lanzado desde un avión F-15, salía en busca de su objetivo para abatirlo. En 1983, después de los vanos intentos de negociación de un tratado sobre armas ASAT con la administración Reagan, la Unión Soviética anunció su compromiso unilateral de no realizar más pruebas con estos ingenios. Dos años más tarde, a pesar de las protestas de la Casa Blanca y del Pentágono, el Congreso de los Estados Unidos aprobó una moratoria de las pruebas en el espacio con el misil lanzado por el F-15. A finales de 1987, las fuerzas aéreas, ante el elevado coste y su limitada capacidad, decidieron suspender las subvenciones para los programas que trataban del desarrollo de este tipo de armas. Las ASAT dormirían en los hangares definitivamente.

Sin embargo, la situación cambió bruscamente el pasado año. La iniciativa de los congresistas que se oponían a las armas ASAT y a la IDE perdió la partida: los defensores de esta alternativa alcanzaron número suficiente para evitar no sólo un decreto restrictivo sobre las armas antisatélite, sino para acabar con la moratoria. Poco después, el Pentágono asignó un presupuesto de 400 millones de dólares para la investigación y el desarrollo de armas ASAT du-

rante el próximo año. Cada ejército está estudiando su propio sistema de intercepción: el ejército de tierra apuesta por el láser de electrones libres, la fuerza aérea aboga por el láser excímero y la marina por un interceptor con base en tierra. Existe otro candidato: un pequeño cohete situado en el espacio, capaz de detectar y dirigirse por sí mismo hacia un blanco y destruir las naves enemigas. Este interceptor, desarrollado en el laboratorio Lawrence Livermore, es un ejemplo avanzado de los "cohetes inteligentes".

Algunos portavoces militares manifestaron en Colorado Springs que el principal objetivo de las ASAT es impedir la utilización de este tipo de armas por la Unión Soviética o cualquier otro país. Sin embargo, otros oficiales pusieron de manifiesto que se considera también la utilización de estos sistemas en un amplio abanico de situaciones. (La marina está preocupada por la fácil detección de sus buques desde el aire o desde el espacio.) La forma de anular los satélites de órbita baja por razones tácticas es un tema importante que se discute desde hace poco.

Esta tendencia preocupa a los observadores. John E. Pike, de la Federación de Científicos Norteamericanos, señala que los satélites espía han desempeñado durante años un papel estabilizador de las relaciones internacionales, ya que actuaban contra los ataques por sorpresa. En consecuencia, las armas ASAT son elementos desestabilizadores. Los ingenios soviéticos, que para destruir un satélite necesitan horas, no suponen una amenaza semejante a la que representan las ASAT que pretenden desarrollar los EE.UU.

Para el senador Tom Harkin, los EE.UU. tienen mucho más que perder que los soviéticos, si se desencadena una carrera de armamentos espaciales. En un artículo reciente en *Arms Control Today*, Harkin advierte que los satélites norteamericanos son mucho más caros y refinados que los soviéticos, y que éstos tienen una notable ventaja en su capacidad de lanzar satélites al espacio, lo que les permitiría reemplazar los que resultaran destruidos con más rapidez. En su opinión, la seguridad de los EE.UU. estará protegida de forma más eficaz si se promueve un tratado bilateral de limitación de las armas antisatélite, que si se establece una carrera tecnológica y agresiva.

Los portavoces militares no comparten estas últimas apreciaciones, ya que desconfían de la protección que pueda aportar un tratado, ni creen en el cumplimiento de la moratoria soviética, puesto que en los últimos años los rusos han desarrollado otros tipos de ingenios, como armas de energía dirigida y dispositivos electrónicos que perturban las emisiones de los satélites.

Paradójicamente, las más serias amenazas sobre el desarrollo de las ASAT tienen un origen doméstico. Durante cierto tiempo, se ha discutido sobre quién debía recaer el control del programa ASAT. En el pasado mes de abril, la marina retiró sus demandas de presupuesto dedicado a la investigación y desarrollo de las ASAT, debido a la decisión del Pentágono por la que se asignaba al ejército de tierra el control sobre el programa. Sin embargo, esta situación debe durar poco y el programa avanzará.

¿Donde nació Halley?

¿Nació el cometa Halley en la cuna del sistema solar primitivo o es un intruso de incierto origen procedente de los confines galácticos? De acuerdo con la teoría más aceptada, agua, monóxido de carbono y otros materiales se condensaron, se combinaron y se solidificaron juntos para formar el cometa Halley en el disco de gas y polvo interestelar en rotación, a partir del cual se creó el sistema solar hace unos 4600 millones de años. La órbita inicial del planeta estaba entre Neptuno y Urano, pero durante millones de años las fuerzas gravitacionales producidas por el tránsito de estrellas y planetas llevó al cometa a su órbita de 76 años, que pasa cerca del Sol y de Venus.

Varios científicos de la Universidad de Arizona acaban de encontrar motivos suficientes para dudar de esta teoría. Cuando el cometa Halley se acercó a la Tierra en 1986, esos investigadores de Arizona observaron la cabellera o atmósfera del cometa, mediante el telescopio del monte Stromlo, en Australia. Analizando la luz emitida por el cometa con un espectrómetro, los astrónomos determinaron qué proporción relativa tenían dos isótopos del carbono que se escapaba de la superfice del cometa.

De ello hablan en un artículo en la revista *Astrophysical Journal*: de acuerdo con sus datos, el cometa contiene 65 partes de carbono 12, por cada parte de carbono 13. Esta proporción es la que se observa en los gases interestelares de la periferia de la galaxia. En cambio, las muestras de la Tierra, la Luna, meteoritos y las atmósferas de los planetas exteriores ofrecen sólo una parte de carbono 13, por 89 de carbono 12.

A pesar de ello, el origen del cometa Halley sólo se podrá descifrar cuando se sepa con certeza si la proporción entre los isótopos del carbono ha cambiado desde la formación del sistema solar. Durante ese período, el carbono 13 despedido por las estrellas gigantes rojas pudo haber enriquecido el medio interestelar de las zonas periféricas de la galaxia, mientras que el sistema solar permanecía constante. En este caso, el cometa Halley podría haberse formado en esas zonas posteriormente a la creación del sistema solar. La fuerza gravitacional del Sol y de los planetas podría haber capturado el cometa. Aunque la captura de un astro de estas características es una posibilidad remota, no puede desestimarse a priori.

Los partidarios de un origen local del cometa refuerzan su posición señalando que el sistema solar primitivo recibió el bombardeo de un flujo de carbono 12 procedente de una explosión estelar que formó el núcleo del sistema solar actual; el cometa Halley, sin embargo, emergió de una zona pobre de carbono 12. Esta hipótesis, según los investigadores, tampoco resulta probable. En cualquier caso, queda la opción de sentarse a la puerta y esperar al año 2061 a la próxima visita del cometa.

Ciencia y empresa

Limpieza solar

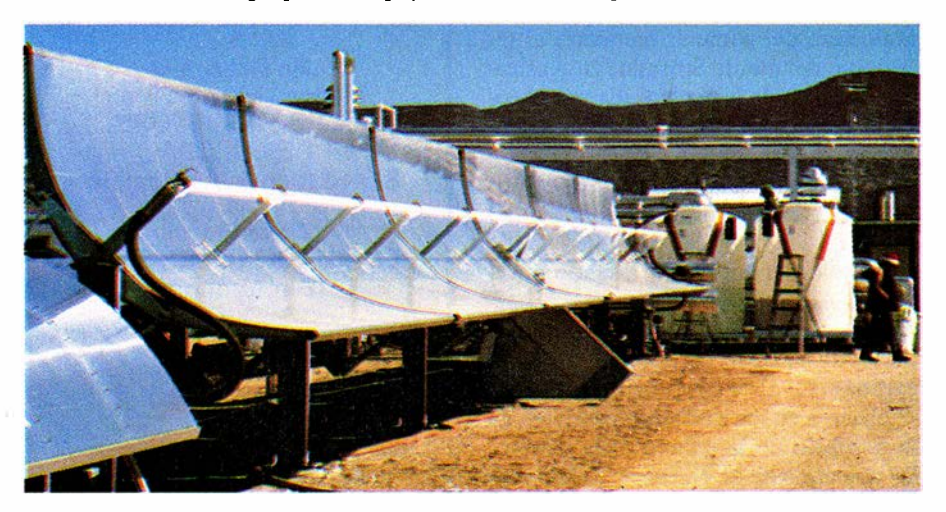
Los esfuerzos para aprovechar la energía que graciosamente nos llega cada día, en forma de radiación solar, se han concentrado, sobre todo, en la generación de energía eléctrica. Se acaba de establecer un programa de colaboración conjunta, entre el Instituto de Investigación de Energía Solar (SERI) en Golden, Colorado, y los Laboratorios Nacionales Sandia en Alburquerque, Nuevo México, para domeñar la energía solar con otra finalidad: la de destruir productos químicos tóxicos en los residuos industriales o en las aguas contaminadas.

En Sandia, Craig E. Tyner somete a prueba un proceso que purifica el agua contaminada con tricloroetileno y otros productos químicos orgánicos. Mezcla el agua con dióxido de titanio, que sirve de catalizador, y la bombea por tubos de pyrex instalados en el foco de espejos parabólicos. La energía ultravioleta de la radiación solar genera radicales hidroxilo activos e iones peróxido, que convierten un tercio de los contaminantes en sustancias inofensivas, al pasar durante 20 segundos sobre un espejo de 40 metros de largo y dos de ancho. El dióxido de titanio se separa fácilmente, por filtración, para volverse a usar.

El paso reiterado del agua contaminada por el tubo rebaja la concentración de contaminantes que se registra en partes por millón, hasta niveles de partes por mil millones. Eso afirma Tyner, quien ya trabaja en experimentos más ambiciosos con grupos de espejos. Sueña con instalaciones solares automáticas de desintoxicación que se paren en el ocaso. La técnica, asegura, podría limpiar las aguas de la proximidad de un vertedero de residuos tóxicos a un coste no superior a 50 ptas 1000 litros.

Pero ni siquiera con esas cifras el proceso de reacción solar podría competir rentablemente con el método de descontaminación acostumbrado: la aireación forzada, en cuya virtud el aire inyectado a través del agua contaminada arrastra las especies químicas orgánicas. Ahora bien, a diferencia de la aireación forzada, el método de Sandia destruye los contaminantes, no los descarga en la atmósfera. Por consiguiente, la técnica ganaría puntos con el endurecimiento de las leyes contra la contaminación ambiental.

En Sandia también, Jim D. Fish se halla afanado en las primeras fases de un proceso que habrá de convertir residuos orgánicos en combustible. El mecanismo en cuestión depende del calor solar, no de sus rayos ultravioleta. Se coloca un catalizador (se está ensayando con el rodio) en una cámara situada en el foco de un reflector paraboloidal. La focalización provoca temperaturas entre 800 y 1000 grados Celsius, suficientes para que el catalizador convierta los restos orgánicos, inducidos a través de la cámara, en monóxido de carbono e hidrógeno. Se promueve la reacción de esos gases para producir metanol, que se usa como combustible. Aunque se está experimentando con metano, Fish confía en fabricar combustibles a partir de hidrocarburos clorados, auténtica amenaza contaminante. El cloro obtenido como subproducto podría transformarse en ácido clorhídrico, que es materia prima empleada en distintos procesos industriales.



1. ESPEJOS PARABOLICOS que focalizan la luz solar sobre tubos que contienen agua contaminada. La energía ultravioleta de la luz solar inicia una reacción que destruye los contaminantes orgánicos del agua. (Fotografía, cortesía del Laboratorio de Sandia.)

John P. Thornton, de SERI, que dirige la investigación conjunta, ha puesto en práctica otra técnica solar que no requiere catalizador. En un horno solar del polígono de pruebas de White Sands ha concentrado luz, con una intensidad de 300 soles, sobre un recipiente de cuarzo que contiene una forma de dioxina. La luz solar convierte rápidamente el 99,9999 por ciento de la dioxina en compuestos inocuos. Esta prestación cumple con la normativa de protección ambiental que regula la instalación y funcionamiento de incineradores de dioxinas, algunas de cuyas formas son altamente tóxicas. Según Thornton, la energía ultravioleta de la luz solar garantiza que la dioxina se destruya a temperaturas no superiores a 750 grados, cientos de grados por debajo de la temperatura que debe alcanzarse en un incinerador.

El proyecto de Thornton ve más lejana su realización que los de Sandia. Sólo ha experimentado con su horno solar en miligramos de dioxina. Lo que no le quita la esperanza de que las primeras tecnologías químico-solares comiencen a trabajar de aquí a cinco años.

Patriotismo de silicio

Las subidas y bajadas del sector del silicio no suelen aparecer en los titulares de la prensa. Las ventas mundiales son modestas: unos 2200 millones de dólares durante el pasado año. La técnica de las obleas ha alcanzado plena madurez desde que la compañía Bell inició su explotación hace ya casi cuarenta años. Pero es un sector que no podía sustraerse al mercado internacional. Esta última primavera Monsanto vendió su división de obleas a una empresa germano-occidental.

Las obleas de cristal de silicio se fabrican fundiendo trozos de silicio policristalino y sembrando el líquido para que crezcan cristales individuales. En ellas se apoya la rentable industria microelectrónica. Aunque ATT, IBM y Texas Instruments fabrican sus propias obleas, la mayoría de los industriales del sector de la microelectrónica las compran en el mercado, graban los circuitos integrados en el silicio y los venden después.

Pero el negocio posee un carácter cíclico manifiesto para los libros de contabilidad, afirma Robert L. Kelley, exconsejero delegado de Monsanto Elec-

tronic Materials (MEMC). La historia de MEMC ha sido, quizás, arquetípica: perdió alrededor de 270 millones de dólares (unos 34.000 millones de pesetas) de 1983 a 1987, y anotó una ganancia neta de 11 millones de dólares (1375 millones de pesetas) el año pasado. Debido en buena parte a esa fluctuación irregular, la división de obleas perdió interés para la compañía.

Sin embargo, las obleas de silicio sí encajan en los planes del Departamento de Defensa de los EE.UU. Un reciente informe del mismo incluía dicha técnica entre las decisivas para mantener la superioridad a largo plazo del arsenal occidental. Cuando Monsanto se preparaba para vender MEMC a Heuls AG, subsidiaria de un conglomerado alemán, el gobierno ordenó un estudio de las implicaciones de la venta sobre la seguridad de los Estados Unidos.

"Trate de imaginar la venta de la última siderúrgica de propiedad norteamericana", dice William C. O'Mara, consultor industrial de Palo Alto. Sin un proveedor nacional, los fabricantes de microcircuitos integrados no tendrán siempre a mano las obleas necesarias y a su tiempo, arguyeron en SEMATECH, consorcio de investigación dedicado a la fabricación de tales microcircuitos, y en SEMI, consorcio de fabricantes de equipo relacionado con aquél.

El estudio del Gobierno norteamericano llegó, sin embargo, demasiado tarde. Otros fabricantes estadounidenses de obleas de silicio habían liquidado sus negocios tras sufrir grandes pérdidas en 1985. Monsanto había congelado los fondos para gastos de capital de MEMC en 1986. De hecho, no fue fácil encontrar comprador para la división; los únicos interesados serios fueron Heuls y varias firmas financieras norteamericanas especializadas en liquidaciones ventajosas. El día 7 de febrero, el presidente Bush convino en permitir que se efectuara la venta de MEMC a la empresa alemana.

Cosa rara, hay todavía varias empresas norteamericanas que fabrican silicio policristalino, materia prima para las obleas. Pero estas firmas también han sido zarandeadas por las subidas y bajadas en la demanda de semiconductores y están tratando de obtener financiación en el extranjero. En 1986, el segundo fabricante de acero del Japón, Nippon Kokan K.K. ingresó en la industria, al adquirir la Great Western Silicon a la General Electric. Nippon Kokan piensa dedicarse a otros segmentos del negocio de microcircuitos, entre ellos, la fabricación de obleas y el diseño de circuitos integrados.

La aurora dinámica

Las interacciones entre el campo magnético de la Tierra y el viento solar crean un enorme generador que produce manifestaciones luminosas. Procesos similares dominan probablemente otros fenómenos astrofísicos

Syun-Ichi Akasofu

Algunos de los primeros observadores de las auroras boreales imaginaron que estas espectaculares manifestaciones del cielo ártico debíanse a la luz del Sol refractada, como en el arco iris, en la atmósfera. El movimiento del aire, especulaban, provocaba las ondulaciones brillantes. Los físicos que estudian las auroras saben ya que éstas son luces emitidas cuando electrones procedentes del Sol chocan contra átomos y moléculas de la ionosfera. El movimiento aparente de la cortina auroral no se debe a turbulencias atmosféricas, sino a cambios en las condiciones electromagnéticas que impulsan las partículas cargadas, lo mismo que el movimiento en una pantalla de televisión es una ilusión creada por cambios en el campo magnético que dirige los electrones desde el tubo catódico hasta la pantalla.

En el caso de la aurora, ¿qué sirve de tubo catódico? ¿Dónde está el suministro de potencia? ¿Por qué esa potencia parece fluctuar de cuando en cuando, haciendo que la aurora fluya a través del cielo polar? Hace más de veinte años se determinó que las emisiones aurorales ocurrían porque la ionosfera sufría el bombardeo de haces de electrones generados en una interacción compleja entre el viento solar y la envoltura magnética de la Tierra. La naturaleza geomagnética de la aurora puede verse claramente desde el espacio exterior. Centrado en cada uno de los polos geomagnéticos, hay un gran óvalo luminoso que constituye una característica permanente del planeta. El que rodea el Polo Norte es la aurora boreal. Su contrapartida en el Sur es la aurora austral.

Mis colegas y yo hemos encontrado una relación numérica entre el viento solar y la generación de potencia que induce la aurora, así como otras perturbaciones del campo geomagnético. Y estamos empezando a conocer mejor la manera en que la actividad del Sol afecta al viento solar. Este avance suscita la interesante posibilidad de desarrollar un método de cálculo por ordenador para predecir la intensidad de la actividad auroral. Las auroras intensas entorpecen las comunicaciones por radio y por satélite, así como las líneas de potencia eléctrica y algunos sistemas de defensa. Por ello, la capacidad de predecir la intensidad auroral ha adquirido una importancia creciente, a medida que la actividad humana se ha ido expandiendo hacia las regiones polares y el espacio.

Un generador en la magnetosfera

El conocimiento de la generación de las auroras llegó tras una revolución en la explicación científica del entorno magnético de la Tierra. Durante mucho tiempo se había supuesto que el campo magnético de la Tierra era esencialmente dipolar, como el de una barra magnética, donde las líneas de campo forman bucles desde el Polo Sur hasta el Polo Norte, simétricamente alrededor del eje geomagnético. Sin embargo, la Tierra no se mueve en el vacío. Es constantemente abofeteada por el viento solar, un plasma diluido de iones de hidrógeno, es decir, protones y electrones que fluyen desde la corona solar.

El viento solar confina el campo magnético de la Tierra dentro de un volumen en forma de cometa: la magnetosfera. Sobre el lado que mira hacia el Sol, el viento comprime la magnetosfera hasta unos diez radios terrestres de distancia. En el lado situado en la dirección en que fluye el viento solar, éste confina la magnetosfera dentro de una estructura en forma de cono truncado: la cola del campo magnético, o cola magnética, se extiende a más de mil radios terrestres. La magnetosfera está llena de plasmas tenues de distinta densidad y temperatura que se originan a partir del viento solar y de la ionosfera [véase "La cola del campo magnético terrestre", por Edward W. Hones, Jr.; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, mayo de 1986].

A principios de los años sesenta, los físicos solares empezaron a reconocer que el viento solar podía extender y llevar el campo magnético coronal hasta los confines del sistema solar. Esta extensión del campo magnético del Sol se llama campo magnético interplanetario. James W. Dungey, del Colegio Imperial de la Ciencia y la Técnica, propuso que este campo magnético podría unirse con las líneas del campo geomagnético originadas en la región polar de la Tierra. Ese fenómeno de reconexión magnética, así se llama, se desarrolla mejor cuando el campo magnético del viento solar está orientado hacia el sur, es decir, se muestra antiparalelo al campo terrestre.

Se aceptaba que la reconexión debía ser un proceso estable, hasta que, hace una década, Christopher T. Russell, de la Universidad de California en Los Angeles, demostró lo contrario. En efecto, se forman "paquetes" o "cuerdas" de líneas de campo que, andando el tiempo, se separan de la magnetosfera y se dejan arrastrar hacia el interior de la cola magnética. Las inestabilidades ocurren aun cuando el campo magnético interplanetario posea una orientación constante hacia el sur. La verdad es que el campo magnético interplanetario cambia constantemente de intensidad y dirección. Estos procesos complejos se han ilustrado en una simulación por ordenador realizada por Lou Chuang Lee, de la Universidad de Alaska en Fairbanks.

SYUN-ICHI AKASOFU, internacionalmente conocido por su trabajo pionero sobre la física de las auroras, es director del Instituto Geofísico de la Universidad de Alaska en Fairbanks. Nació en Japón y obtuvo su licenciatura en la Universidad de Tohoku. Recibió el doctorado en geofísica por la Universidad de Alaska en 1961; ha sido profesor de física allí desde 1964.

A medida que las partículas del viento solar fluyen por el contorno de la magnetosfera (la magnetopausa), atraviesan las líneas del campo magnético reconectadas. Los iones y electrones, de carga eléctrica opuesta, se desvían en direcciones opuestas (según la familiar regla de la mano derecha), generando una corriente eléctrica [*véase la figura 3*].

Este proceso es el mismo que la generación de potencia magnetohidrodinámica. La verdad es que la magnetopausa entera constituye un generador gigante que convierte la energía cinética de las partículas del viento solar en energía eléctrica, produciendo más de un millón de megawatt de potencia. Este mecanismo se llama generador "viento solar-magnetosfera", o generador auroral.

El mecanismo generador lleva los iones positivos hacia el lado del amanecer del plano ecuatorial de la magnetopausa, creando una terminal positiva; los electrones son conducidos hacia el lado del anochecer, o terminal negativa. En plasmas poco densos y penetrados por las líneas de campo magnético, tales como las que llenan la magnetosfera, los electrones recorren trayectorias similares a un sacacorchos, enroscándose alrededor de las líneas de campo. El proceso por el cual se generan las "corrientes alineadas con el campo" ha sido explicado, en detalle, por Akira Hasegawa, de los Laboratorios AT&T Bell, y otros científicos. Thomas A. Potemra, de la Universidad Johns Hopkins, Takesi Iijima, de la Universidad de Tokyo, y otros autores han confirmado la existencia de corrientes mediante el uso de magnetómetros instalados a bordo de satélites.

Corrientes alineadas con el campo

Las corrientes alineadas con el campo conectan la magnetopausa con la ionosfera. La cara del amanecer de la magnetopausa se proyecta, por este motivo, hacia la mitad del amanecer del óvalo auroral, mientras que la cara del anochecer de la magnetopausa se proyecta hacia la mitad del anochecer del óvalo. La cara del alba del óvalo se vuelve, entonces, eléctricamente positiva, y la cara del crepúsculo, eléctricamente negativa. La caída de potencial o diferencia de voltaje a través del óvalo es de unos cien kilovolt.

Las corrientes alineadas se deben más a los electrones que a los protones,



1. EN EL CIELO DEL ATARDECER sobre Fairbanks, Alaska, aparece un "oleaje" que se dirige hacia el oeste a lo largo de una aurora activa. La luz blanquecina se debe a átomos de oxígeno. Las moléculas de nitrógeno ionizadas producen la luz rosa, cerca de la franja inferior de la cortina. A la izquierda se ve una imagen en falso color del óvalo auroral situado sobre el Polo Norte. La imagen fue tomada por el satélite *Dinamics Explorer*, desde una distancia de tres radios terrestres. Muestra emisiones de átomos de oxígeno en una longitud de onda de 130 nanómetros. El cuarto creciente brillante, a la izquierda, corresponde al lado diurno de la Tierra. La imagen ha sido cedida por Louis Frank.

por ser aquéllos más móviles. En el escenario descrito antes, las corrientes de electrones fluyen hacia abajo, hacia la mitad del crepúsculo del óvalo, y hacia arriba desde la mitad del amanecer. Como las auroras se producen cuando los electrones colisionan en la ionosfera, uno podría muy bien preguntar: ¿por qué hay emisiones en la cara del amanecer del óvalo? En la ionosfera el óvalo es óptimo conductor y, por tanto, fluye corriente entre los límites interior y exterior del mismo. La corriente cursa entonces hacia atrás, a lo largo de las líneas de campo magnético, produciendo una corriente secundaria que apunta en la dirección opuesta a la de la primaria. Las corrientes secundarias de electrones producen emisiones aurorales en el lado del amanecer.

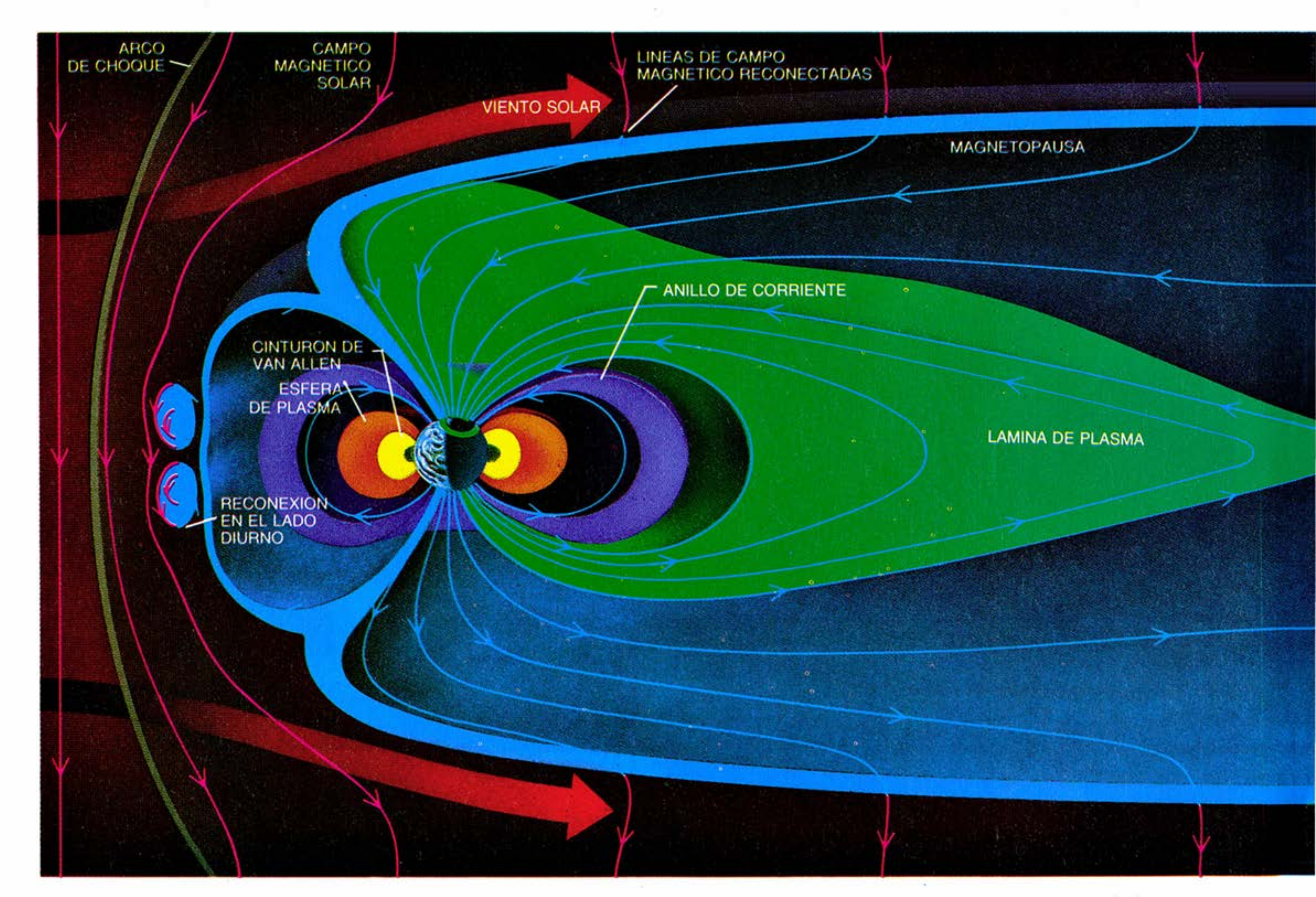
Las luces aurorales se generan cuando los haces de electrones que se acercan chocan enérgicamente con la ionosfera, excitando o ionizando átomos y rompiendo moléculas para crear otros átomos excitados. Los átomos excitados e ionizados emiten radiación en un amplio rango espectral (desde el ultravioleta lejano al infrarrojo), a medida que los electrones excitados van cayendo hacia estados de menor energía y los iones se combinan con electrones libres.

¿Por qué en forma de cortina?

La más común de las emisiones aurorales es una luz verde blanquecina, con una longitud de onda de 557,7 nanómetros, que emiten los átomos de oxígeno. La hermosa emisión rosa proviene de moléculas excitadas de nitrógeno. Varios átomos y moléculas comunes producen emisiones aurorales en el ultravioleta extremo, el ultravioleta y longitudes de onda infrarrojas, pero éstas no pueden observarse desde tierra porque son absorbidas por la atmósfera que se encuentra interpuesta en medio.

Las imágenes de emisiones en el ultravioleta extremo tomadas por el satélite sueco Viking muestran que la aurora es sorprendentemente activa en el lado iluminado por el Sol, a menudo más activa que en el oscuro.

Desde el suelo, la aurora semeja una cortina de luz listada de rayos. La cortina comienza a una altura de varios cientos de kilómetros y termina a unos cien kilómetros sobre el suelo, donde la atmósfera se hace tan densa que detiene la mayoría de los electrones que llegan. La lámina, con menos de un kilómetro de grosor, se extiende lateralmente miles de kilómetros. ¿Cómo explicar este fenómeno? No deja de llamar la atención que las corrientes de electrones alineadas con el campo sean capaces de alcanzar la baja ionosfera. Como para otras partículas cargadas de los cinturones de radiación de Van Allen, la pendiente del movimiento helicoidal de los electrones tiende a incrementarse a medida que éstos se van acercando a la Tierra (donde el campo es más fuerte). Este movimiento se vuelve completamente circular a bastante altura por encima de la ionosfera. En esa zona, los electrones se reflejan hacia arriba. Sin embargo, las auroras



2. LLAMAMOS VIENTO SOLAR a un plasma difuso de protones y electrones que fluye desde el Sol y confina el campo magnético terrestre en una cavidad en forma de cometa: la magnetosfera. El viento comprime la magnetosfera en el lado diurno hasta una distancia de unos diez radios terrestres. En el lado nocturno, el viento arrastra el campo magnético de la Tierra dentro de un volumen alargado, la cola magnética, que se extiende hasta más de mil radios terrestres. El límite de la cola se llama magnetopausa. El viento solar tiene un campo magnético (*rojo*). Cuando está dirigido hacia el sur, según se muestra aquí, puede "reconectarse" eficientemente con el campo magnético de la Tierra (*azul*). Las partículas del viento solar fluyen hacia el interior de la magnetosfera por las

dan fe de la capacidad de los electrones para adentrarse profundamente en la ionosfera.

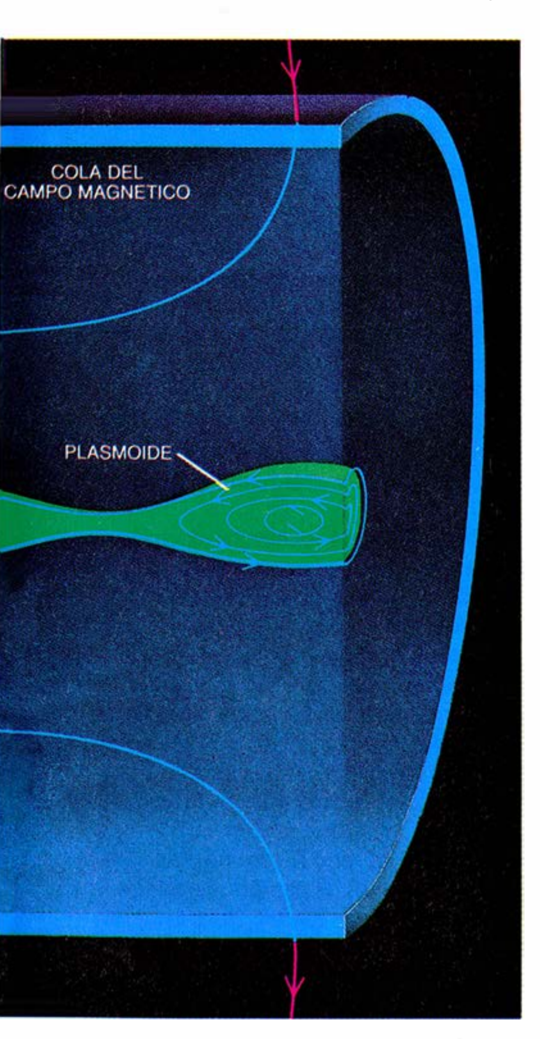
El proceso parece empezar cuando los electrones de las corrientes alineadas con el campo forman haces delgados, como láminas. Sin que sepamos todavía cómo, cuando se bombea dentro de la magnetosfera suficiente potencia y cuando los haces laminados alcanzan una intensidad suficientemente alta, se desarrolla a su alrededor un campo eléctrico peculiar, llamado "estructura potencial auroral", a una altitud entre 10.000 y 20.000 kilómetros. La región encerrada dentro de la estructura aparece separada en niveles positiva y negativamente cargados, produciendo un fuerte campo eléctrico entre ellos [*véase la figura 4*]. Hannes Alfvén, de la Universidad de California en San Diego, sugirió ya la presencia de esa "doble capa" sobre la aurora.

Se sabe que, en la superficie del electrodo de una luz de neón, se forma una estructura parecida a una doble capa, pero la naturaleza exacta de la que se produce en la alta atmósfera de la Tierra es, hasta el momento, objeto de controversia. Los electrones parecen acelerarse hacia abajo, debido al campo eléctrico que acompaña a la doble capa. Los electrones adquieren algunos miles de electronvolt de energía, al tiempo que alcanzan la parte baja de la estructura potencial auroral, energía suficiente para penetrar hasta una altitud en la que la atmósfera, bastante densa, deja visibles las emisiones aurorales sin ayuda de ningún instrumento. La forma plana de la estructura potencial es la que causa la apariencia de cortina de las auroras.

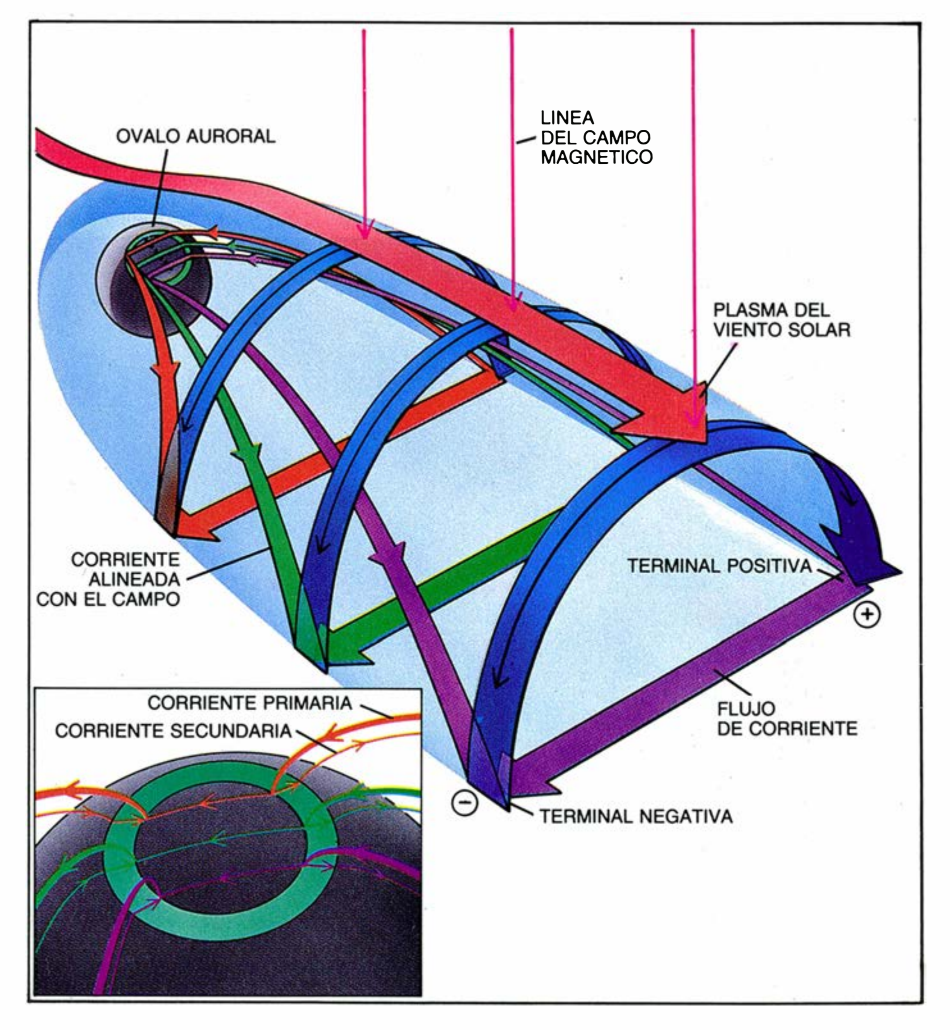
Los rayos emitidos a través de la cortina auroral son, en realidad, una serie de vórtices que se crean cuando los campos eléctricos antiparalelos (asociados con la estructura potencial auroral), situados a lo largo de la superficie de la cortina, hacen que los electrones fluyan en direcciones opuestas, exactamente igual que se forman remolinos en el límite de las corrientes de agua que cursan en direcciones contrarias. Con cámaras de televisión de alta velocidad apuntando hacia arriba, hacia la parte inferior de la cortina, se han captado imágenes de tales vórtices; y en modelos de ordenador de formación de vórtices se generan estructuras notablemente similares.

La energía de los electrones de las auroras, en relación con la distribución espacial de la estructura potencial, se ha estudiado exhaustivamente con instrumentos colocados a bordo de cohetes y satélites. Lo han hecho Louis A. Frank, de la Universidad de Iowa, James L. Burch, del Instituto de Investigación del Sudoeste, Patricia H. Reiff, de la Universidad de Rice, y Bengt Hultqvist y sus colaboradores, del programa del satélite sueco Viking. Los investigadores de la empresa Lockheed Missiles and Space han confirmado que la estructura potencial auroral acelera también los iones positivos hacia arriba; estos iones constituyen, a veces, parte importante del plasma magnetosférico.

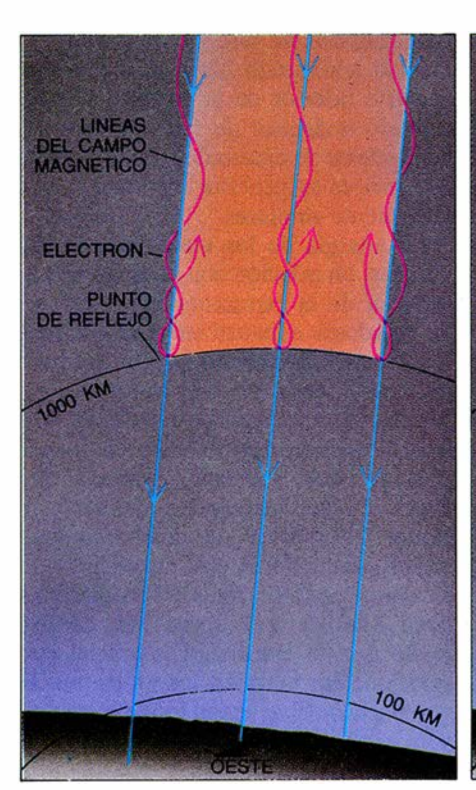
Las interacciones de partículas y on-

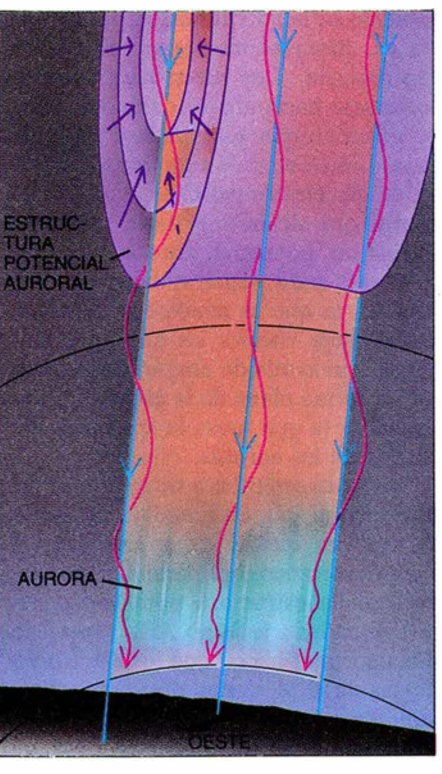


líneas de campo reconectadas. Las líneas de campo del lóbulo norte de la cola magnética apuntan hacia la Tierra; las del lóbulo sur apuntan en dirección opuesta. La reconexión de las líneas de campo en la cola puede presionar hacia fuera masas de plasma.

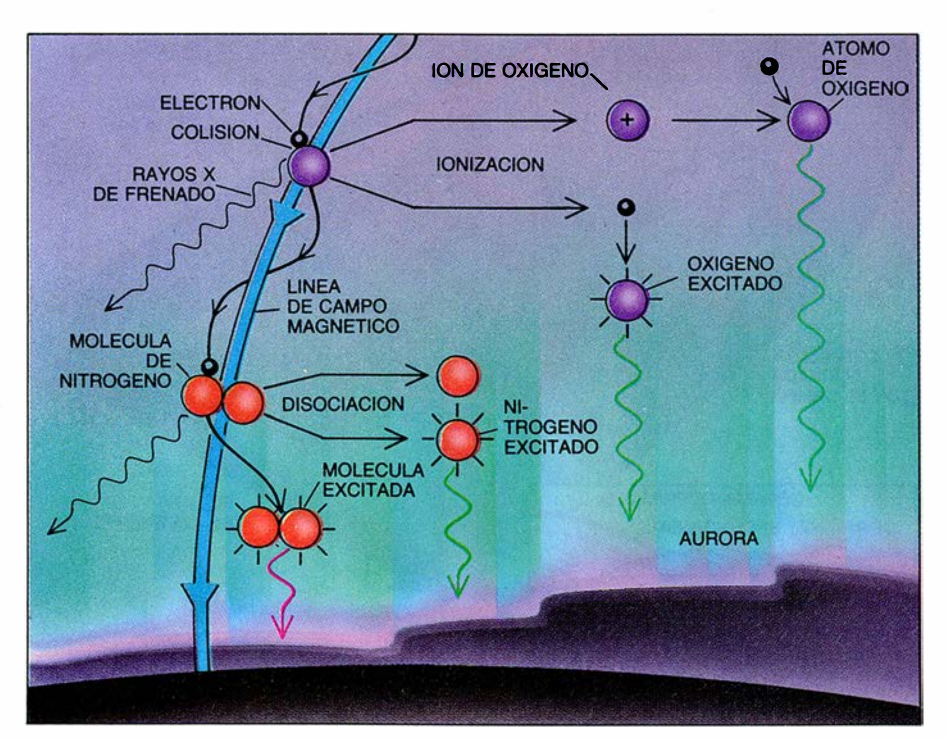


3. A MEDIDA QUE EL PLASMA del viento solar fluye a través de las líneas de campo magnético de la magnetopausa, los protones se desvían hacia el lado diurno de la cola magnética y los electrones hacia el nocturno. La corriente eléctrica fluye entre las dos regiones, la mayor parte de ella y a través de la cola, pero una fracción lo hace a lo largo de las líneas de campo magnético, hacia y desde un vasto óvalo en la ionosfera. Los electrones transportan esta corriente alineada con el campo, excitando las emisiones aurorales.





4. ALINEADOS CON EL CAMPO, LOS ELECTRONES trazan un camino helicoidal alrededor de las líneas del campo magnético. Conforme aquéllos descienden hacia la ionosfera, aumenta la pendiente de sus trayectorias, hasta que se reflejan hacia arriba (*esquema de la izquierda*). En ciertas situaciones (*esquema de la derecha*), aparece alrededor de las líneas de campo magnético un campo eléctrico peculiar: la estructura potencial auroral. Los electrones acelerados en la dirección de la corriente por la estructura potencial podrían adentrarse en la ionosfera. La estructura potencial es muy delgada de norte a sur, pero se extiende de este a oeste a lo largo de miles de kilómetros, confiriendo a la aurora su forma característica de cortina.



5. ATOMOS Y MOLECULAS de la baja ionosfera. Emiten radiación cuando son golpeados por electrones acelerados por la estructura potencial auroral. Los electrones decelerados por las colisiones emiten rayos X de frenado (radiación bremsstrahlung). Las colisiones fraccionan las moléculas en átomos excitados que emiten radiación, a medida que van cayendo hacia estados de menor energía. Los electrones involucrados en las colisiones golpean y excitan átomos que, entonces, emiten radiación. Los electrones también ionizan los átomos; y éstos, a su vez, emiten radiación al entrar en recombinación con otros electrones.

das electromagnéticas en un plasma tienen lugar también en la estructura potencial auroral, generando intensas ondas de radio. Donald A. Gurnett, de Iowa, hizo ver que estas emisiones eran tan intensas que una inteligencia extraterrestre las detectaría mucho antes de poder alcanzar visualmente la Tierra. Estas emisiones no se interfieren con las emisoras de radio terrestres porque la ionosfera las refleja hacia arriba, del mismo modo que refleja hacia la Tierra las emisiones provenientes del suelo.

La existencia de la estructura potencial auroral debería revestir gran interés para los astrofísicos y físicos solares, así como para los físicos que estudian las auroras, pues se sigue creyendo todavía que no se puede mantener un campo eléctrico significativo a lo largo de las líneas de campo magnético en un plasma rarificado y, por tanto, las partículas cargadas no pueden acelerarse de ese modo. La observación de este campo en conexión con las auroras puede encontrar amplia aplicación en diversas condiciones astrofísicas, tales como las de la Nebulosa del Cangrejo, porque tiene una densidad y una energía del plasma similares a las de la magnetosfera.

Chorros eléctricos y subtormentas

La mayor inyección de energía del generador auroral en la ionosfera se produce gracias a un par de corrientes eléctricas, llamadas chorros eléctricos hacia el este y hacia el oeste. Estas corrientes, que se mueven a lo largo del óvalo auroral en la baja ionosfera, provocan un intenso calentamiento que contribuye a la generación de vientos a gran escala en la atmósfera polar más alta.

¿Cómo surgen los chorros eléctricos? No olvidemos que las corrientes alineadas con el campo fluyen entre los bordes exterior e interior del óvalo. Las corrientes se deben a un campo eléctrico que es paralelo a la superficie de la Tierra y, por tanto, perpendicular al campo magnético terrestre en los polos [*véase la figura 6*]. En presencia de estos campos perpendiculares entre sí, las partículas cargadas sufren un corrimiento E-B (donde E simboliza el campo eléctrico y B, el campo magnético); en virtud de ese efecto, las partículas positivas y negativas derivan en la misma dirección, desde el lado nocturno hacia el diurno.

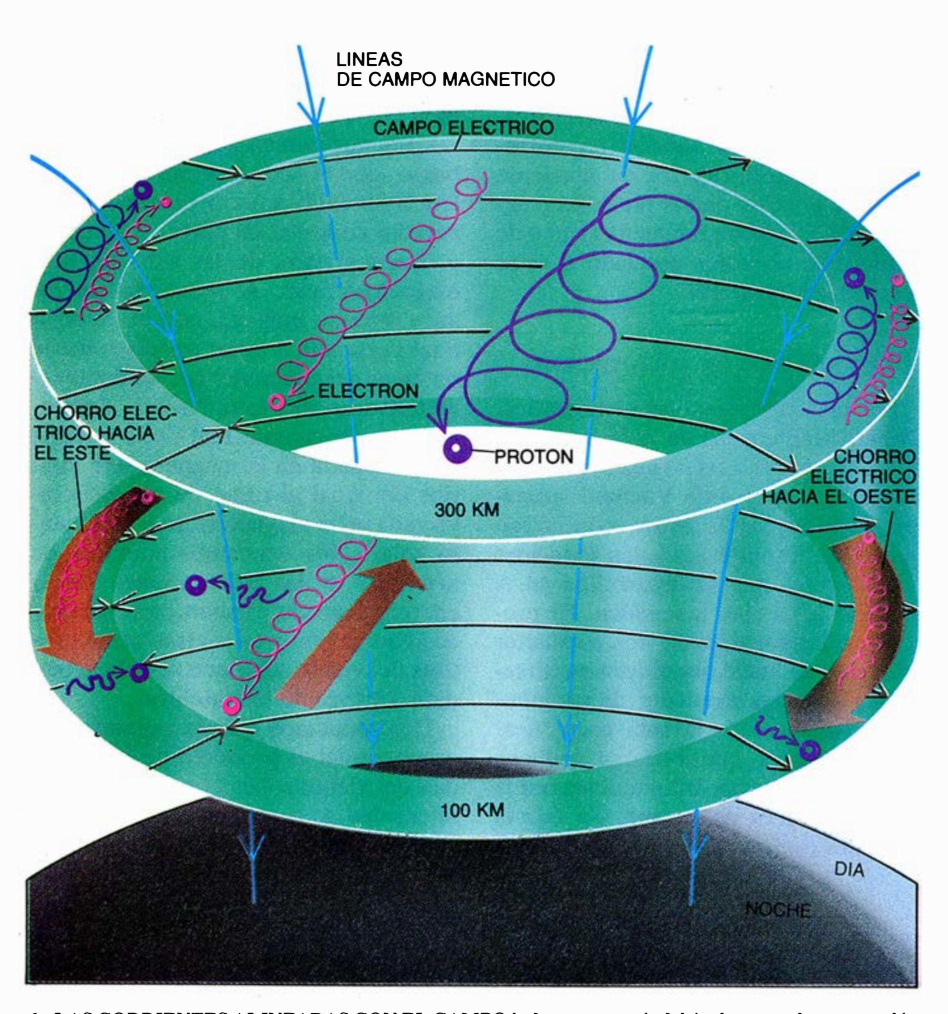
En la alta ionosfera, las partículas que sufren este corrimiento viajan a la misma velocidad y, por tanto, no dan

una corriente neta, pero imparten momento a las partículas neutras, contribuyendo además a la generación del viento. En la baja ionosfera, sin embargo, los protones chocan, con excesiva frecuencia, con partículas neutras y escapan al corrimiento E-B. Como resultado, sólo los electrones pueden fluir a lo largo del óvalo auroral. Se da, pues, una corriente de electrones neta que apunta hacia el este en el sector de la tarde y hacia el oeste en el de la mañana.

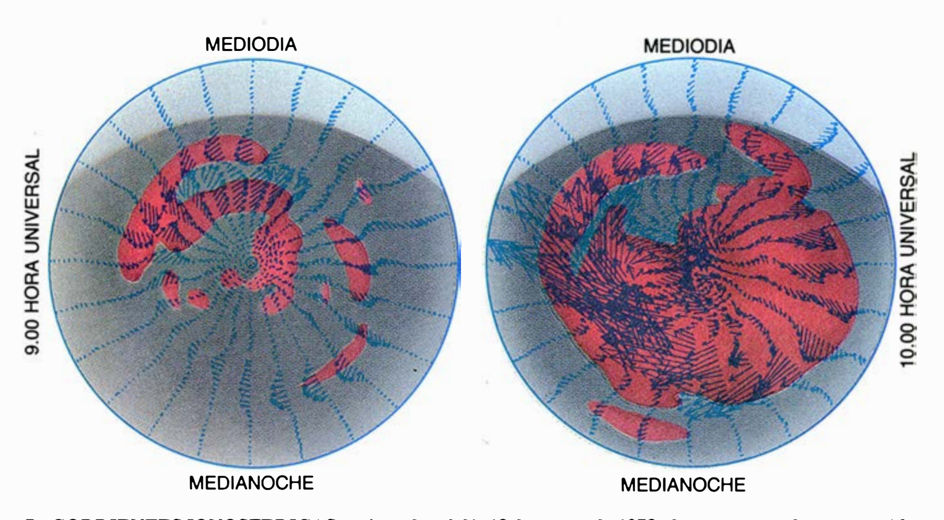
En el Año Geofísico Internacional (de 1957 a 1958) se realizaron observaciones, con cámaras, del cielo entero, que revelaron una peculiaridad sistemática de la actividad auroral sobre la región polar, desconocida hasta el momento: la "subtormenta auroral". La primera indicación de una subtormenta es la súbita intensificación del brillo de la cortina auroral desde el atardecer hasta medianoche. Este brillo se extiende rápidamente a lo largo de la cortina, en ambas direcciones, de modo que, en cosa de minutos, la sección entera de la cortina del hemisferio oscuro se torna brillante.

Esa cortina luminosa comienza a moverse hacia el polo en el sector de la medianoche, a una velocidad de varios cientos de metros por segundo. Al mismo tiempo, se genera allí una estructura combada a gran escala. Aparecen movimientos ondulantes cerca del límite oeste de la comba y se propagan hacia el oeste con una velocidad de un kilómetro por segundo. A mitad de camino alrededor del polo, en el sector de la mañana, las cortinas aurorales se desintegran en muchos "trozos". El movimiento hacia los polos en el sector nocturno dura de treinta minutos a una hora. Después de que este avance hacia el polo alcance su latitud más alta, la actividad auroral comienza a calmarse. La subtormenta dura generalmente entre una y tres horas.

La subtormenta auroral constituye una manifestación de las subtormentas magnetosféricas; de éstas se producen unas cuatro o cinco al día. Otras manifestaciones incluyen chorros eléctricos muy intensos que, a su vez, causan fuertes perturbaciones geomagnéticas: las subtormentas magnéticas polares. El día 18 de marzo de 1978 se registró en detalle una de estas tormentas, en un proyecto internacional en el que se utilizó un equipo de más de setenta magnetómetros en la región ártica, instalados a lo largo de seis "líneas" que partían radialmente desde el Polo Norte magnético. Potentes programas de



6. **LAS CORRIENTES ALINEADAS CON EL CAMPO inducen, a través del óvalo auroral, campos eléctricos que son perpendiculares al campo geomagnético. En tal situación, los electrones y protones se mueven en la misma dirección, hecho que se conoce como corrimiento E-B. El corrimiento sobre el casquete polar se produce en dirección opuesta al que va a lo largo del óvalo, puesto que los campos eléctricos apuntan en direcciones opuestas. (Las partículas siguen caminos espirales porque la llamada fuerza de Lorentz las obliga a moverse en círculos alrededor de las líneas de campo magnético.) En la alta ionosfera, electrones y protones avanzan a la misma velocidad y no hay corriente neta. En la baja ionosfera, los protones sufren muchas colisiones y terminan moviéndose en la dirección del campo eléctrico mejor que según el corrimiento E-B. En virtud de todo ello, asistimos a una corriente neta de electrones, produciéndose chorros eléctricos.**



7. **CORRIENTES IONOSFERICAS registradas el día 18 de marzo de 1978, durante una subtormenta (*derecha*), mucho mayores que las registradas justo una hora antes (*izquierda*). La actividad se muestra desde encima del Polo Norte magnético, con la cara diurna arriba y la nocturna abajo. Las flechas apuntan en la dirección de las corrientes y su longitud indica la fuerza de la corriente. Durante la subtormenta, se observó un chorro eléctrico dirigido hacia el oeste en el sector oscuro y un chorro eléctrico dirigido hacia el este, en el sector de la tarde. La cantidad de calor generada por la actividad eléctrica se señala en rojo.**

ordenador permitieron que Yosuke Kamide, de la Universidad Sangyo de Kyoto, y Yasha I. Feldstein, de la Academia Soviética de Ciencias, reconstruyeran la distribución de la corriente eléctrica a partir de los registros magnéticos. Calcularon también el ritmo de producción de calor asociado a estas corrientes ionosféricas.

Dinámica de las subtormentas

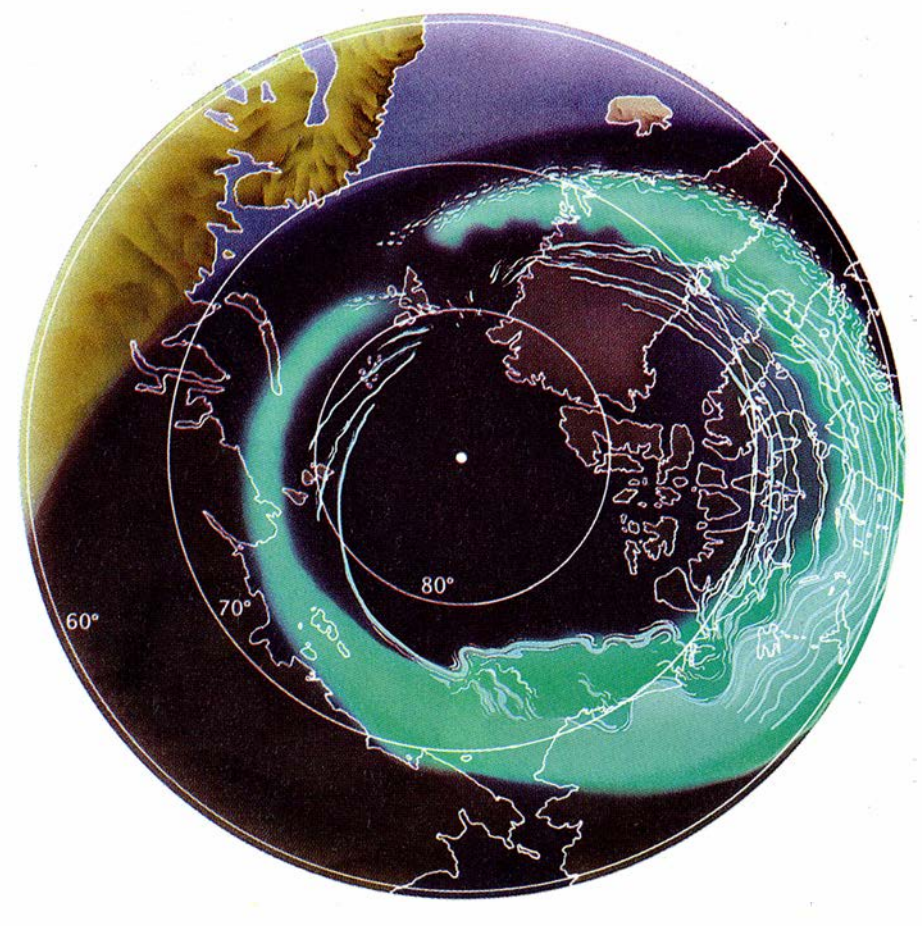
Muchos investigadores, entre ellos, Robert McPherron, de la Universidad de California en Los Angeles, y Daniel Baker, del Centro de Vuelos Espaciales Goddard de la NASA, consideran que las subtormentas vienen inducidas por procesos que se desarrollan en el interior de la cola magnética. El proceso generador impulsa dos corrientes en forma de bucle que fluyen en direcciones opuestas alrededor de los lóbulos norte y sur de la cola magnética. Las corrientes que circulan inducen campos magnéticos antiparalelos por la longitud entera de la cola. Se acepta que tales campos antiparalelos podrían reconectarse espontánea y explosivamente, liberando la energía necesaria para provocar las subtormentas.

Cada vez parece más claro, sin embargo, que el apogeo y caída de la potencia obtenida a partir del proceso generador controla, en parte, el aumento y desintegración de las subtormentas magnetosféricas. A principios de los años setenta, empecé, con mi alumno Paul Perreault, a tratar de relacionar la potencia del generador con distintas características del viento solar. Supusimos que la cuantía real de la energía total disipada en la magnetosfera interior era igual al ritmo de potencia inyectada en la magnetosfera por el viento solar. Nos ocupamos entonces de averiguar si las fluctuaciones de la energía disipada estaban correlacionadas con cambios en ciertas características del viento solar que se habían medido a través de los satélites.

Determinamos que la potencia era proporcional al producto de la velocidad del viento solar, el cuadrado de la intensidad de su campo magnético y la cuarta potencia del seno de la mitad del ángulo polar (medido desde el Polo Norte) según el cual este campo incide en el campo magnético terrestre. En otras palabras, la potencia es cero cuando el campo magnético del viento solar apunta hacia el norte, porque entonces el ángulo polar es de cero grados y, por tanto, su seno vale cero. Recíprocamente, la potencia presenta un máximo cuando el campo magnético apunta hacia el sur (cualquier otra cosa da igual), porque entonces el ángulo polar es de 180 grados y la función seno alcanza su máximo valor.

Mikhail Pudovkin y sus colegas, de la Universidad de Leningrado, junto con otros investigadores, han deducido por vía teórica la misma fórmula, suponiendo que la magnetosfera se comporta como un generador magnetohidrodinámico. Reiff y sus colegas han demostrado que las variaciones medidas en la caída de potencial a través del casco polar (el voltaje producido por el generador auroral) guardan estrecha relación con la potencia calculada a partir de nuestra ecuación. Es más, todo incremento de la potencia superior a 10.000 megawatt se asocia, no sólo con un incremento de la caída de potencial, sino también con una intensificación de las subtormentas aurorales.

Encontramos que el óvalo auroral se estrecha y se ensancha, dependiendo de la cantidad de potencia suministrada por el generador auroral, la cual es, a su vez, función de la componente norte-sur del campo magnético interplanetario. Tales observaciones indican que las subtormentas ocurren mucho más a menudo cuando el vector campo magnético del viento solar se vuelve hacia el sur: prueba sólida de que las subtormentas están estrechamente controladas por el viento solar, más que por sucesos espontáneos que acontezcan en el interior de la magnetosfera.



8. DETALLE DEL OVALO AURORAL, en esta vista ilustrada desde encima del polo norte geográfico. Una aurora difusa arrastra un cinturón liso desde el sector de la tarde al de la medianoche. Tiene una luminosidad moderadamente uniforme en el sector de la tarde y basta a menudo para llenar el campo de vista de un observador en tierra. A lo largo del lado orientado hacia el polo de la aurora difusa, se distribuyen auroras discretas en forma de cortina. A la altura de una subtormenta, hacia la medianoche, avanzan hacia el polo formas brillantes, como se muestra aquí. Hacia el sector de la mañana, la porción difusa parece desintegrarse en estructuras en forma de cortina y en trozos situados en el perímetro exterior del óvalo.

Cuestiones pendientes

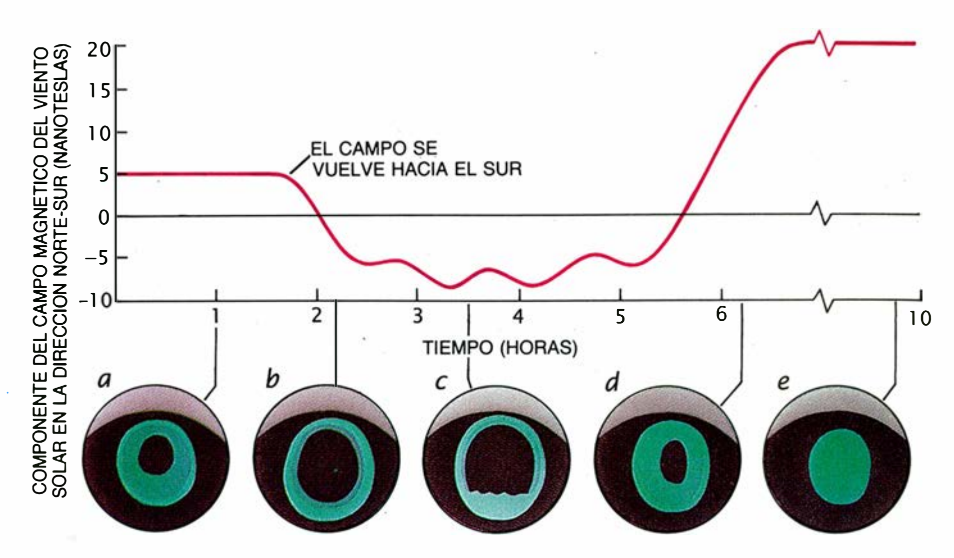
Todavía no se comprende bien qué es lo que desencadena las subtormentas. En particular, un incremento de la potencia del generador no puede dar cuenta por sí solo de la súbita iluminación de la cortina auroral. Joseph R. Kan, de la Universidad de Alaska en Fairbanks, afirma que el brillo se produce porque las corrientes alineadas con el campo son amplificadas por efectos originados en la ionosfera cuando se acentúa el corrimiento E-B por culpa de una fluctuación en la potencia del generador.

Pero, ¿qué ocurre si, en vez de apuntar hacia el sur, el campo magnético es

mayor y apunta hacia el norte durante un período dilatado? A medida que la potencia del generador auroral va remitiendo, la aurora se vuelve opaca y los chorros eléctricos se debilitan. Con esas condiciones se produce un fenómeno auroral inesperado. Varias cortinas aurorales se extienden a través del casco polar en una dirección paralela al meridiano mediodía-medianoche; auroras divididas en trozos, apenas visibles, se desplazan a través del casco polar en la misma dirección. Estas auroras no pueden explicarse sólo en función de la potencia decreciente del generador y transcienden el ámbito de este artículo.

El modelo del generador auroral de potencia que he venido describiendo concierne a la reconexión magnética en la cara de la magnetosfera que mira al Sol. Se espera que haya también reconexión en la cola magnética, en un proceso que el generador induce y en parte controla. Contamos con las pruebas aportadas por James A. Slavin y Bruce T. Tsurutani, del Laboratorio de Propulsión a Chorro, en el sentido de que la velocidad del flujo de plasma lejos de la Tierra, a una distancia de unos 200 radios terrestres en la dirección de la corriente, está correlacionada con la intensidad de los chorros eléctricos aurorales. Se cree que el flujo en la dirección de la corriente viene impulsado por la energía que la reconexión magnética de la cola magnética libera.

A medida que la aurora se ilumina, las láminas de plasma de la cola magnética se vuelven, primero, muy delgadas y, poco tiempo después, dan lugar a actividades muy diversas en la cola magnética. Se espera que estos fenómenos estén relacionados con la dinámica de la aurora durante las subtormentas. El Proyecto Internacional de Física Solar y Terrestre, empeño en el que intervienen muchos satélites y que se encuentra ahora en el estadio final de su planificación, habrá de responder a esas cuestiones.



5. CUANDO EL VECTOR DE CAMPO MAGNETICO del viento solar apunta hacia el norte, el óvalo auroral es pequeño y está lleno, en su mayor parte, por un resplandor apenas visible (*a*). A medida que el campo se vuelve hacia el sur, el óvalo se ilumina y se expande rápidamente; el débil resplandor desaparece, excepto a lo largo de un estrecho cinturón del interior del óvalo (*b*). Aproximadamente una hora más tarde, comienza una subtormenta y avanzan cortinas brillantes hacia el polo. La subtormenta alcanza su máximo al cabo de una o dos horas (*c*). Después de que el campo apunte de nuevo hacia el norte, la aurora se vuelve opaca y las cortinas paralelas al meridiano mediodía-medianoche aparecen a través del casco polar (*d*). Cuando el vector de campo ha tenido una gran componente hacia el norte durante bastantes horas, el borde del óvalo puede disiparse, dejando un resplandor sobre toda la región polar (*e*). (Dibujos de Ian Worpole.)

Más allá de las auroras

La potencia del generador auroral está controlada, en último término, por la actividad del Sol; en particular, por fenómenos pasajeros tales como las fulguraciones solares y la eyección masiva de gases coronales, que generan ondas de choque que se propagan con el viento solar. Detrás mismo del frente de onda, el viento solar alcanza una velocidad de 500 a 1000 kilómetros por segundo; al estar comprimido el campo magnético, aumenta en magnitud. A medida que la onda de choque va colisionando con la magnetosfera, la potencia del generador puede subir hasta diez millones de megawatt o más, con tal de que el campo magnético esté dirigido hacia el sur.

Esta situación puede producir una tormenta geomagnética, durante la cual el óvalo auroral se expande anormalmente. Conforme el óvalo se extiende hacia el sur, puede desaparecer del cielo de Alaska y aparecer en la latitud de la frontera entre los Estados Unidos y Canadá, o incluso más abajo. La emisión producida por átomos de oxígeno en el rojo (a una longitud de onda de 630 nanómetros) se acentúa notablemente en estas auroras, quizá porque la mayor potencia excita térmicamente los átomos de oxígeno hacia estados de mayor energía. Al mismo tiempo, las corrientes intensificadas en los cinturones de Van Allen crean grandes campos magnéticos incluso en latitudes más bajas y sobre el suelo.

Recientemente, mis colegas de física solar y yo hemos estado tratando de entender el efecto producido por las ondas de choque solares en la magnetosfera. Una fulguración en el centro del disco solar podría generar una onda de choque que se propagaría hacia la Tierra a lo largo de la línea Sol-Tierra. En esta situación, el frente de onda chocaría casi frontalmente con la "nariz" de la magnetosfera; el campo magnético interplanetario sufriría una gran compresión y se incrementaría, por tanto, en magnitud. Lo que, a su vez, elevaría notablemente la potencia del generador auroral. Si la fulguración se produjera cerca del borde del disco solar, su onda de choque se propagaría en una dirección perpendicular a la línea Sol-Tierra y, por tanto, podría desviarse de la "nariz" de la magnetosfera, produciendo sólo una compresión insignificante. En esta situación, ni siquiera una fulguración intensa lograría causar una manifestación auroral reseñable.

Otro fenómeno solar que afecta a la actividad auroral son los "agujeros" de la corona: regiones libres de manchas. Los tales generan torrentes de viento solar de alta velocidad. Muestran particular desarrollo en la época de decadencia del ciclo de manchas. A menudo aparecen simultáneamente dos grandes agujeros, uno hacia el polo norte solar y el otro diametralmente opuesto, hacia el polo sur. Cada uno expele viento solar en un amplio chorro.

Como el Sol rota con un período de unos veintisiete días con respecto a la Tierra, existe un efecto de aspersión en la rotación: un chorro llega a la Tierra y es seguido, dos semanas más tarde, por el otro. La Tierra se halla inmersa en cada chorro más o menos durante una semana. En este tiempo, la potencia del generador es alta y variable. Los agujeros coronales tienden a durar muchos meses; así, en la época de decadencia de un ciclo de manchas, habrá dos intervalos de una semana de acti-

vidad auroral cada veintisiete días, en el curso de muchos meses. El viento solar parece expulsarse a mayor velocidad desde las latitudes más altas del agujero coronal; ésta puede ser la razón por la cual la actividad auroral se intensifica alrededor de los meses equinocciales de primavera y otoño, cuando la Tierra está en las más altas latitudes heliográficas.

La clave para entender ciertos sucesos solares puede yacer en las propias auroras. Lo mismo que ellas, las fulguraciones solares se deben a emisiones atmosféricas de átomos excitados, aparecen brillantes en forma de cortina y son, sin duda, manifestaciones de procesos similares. Durante mucho tiempo, se ha sugerido que la energía de las fulguraciones se suministra en la reconexión magnética del campo magnético del Sol. La teoría requiere la existencia de los "campos libres de fuerza", que son idénticos a las corrientes alineadas con el campo en la magnetosfera terrestre. Es, por tanto, esencial encontrar un mecanismo generador que pueda proporcionar la potencia eléctrica para los campos libres de fuerzas y las fulguraciones solares. Quizá los movimientos gaseosos en la superficie visible del Sol, que se parece a la ionosfera terrestre, generan la potencia necesaria.

Es de esperar que el estudio de las auroras contribuya a la comprensión de múltiples fenómenos astrofísicos. Después de todo, los plasmas rarificados e impregnados de campos magnéticos son intrínsecos a la mayoría de los objetos astronómicos; la interacción entre los flujos de plasma magnetizado y la atmósfera de tales cuerpos celestes magnetizados (estrellas, planetas y cometas) puede resultar, tal vez, un fenómeno bastante común. De esa interacción, únicamente la aurora ofrece un laboratorio preparado, donde los científicos pueden someter a prueba y confirmar sus teorías a través de la observación directa.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

SOLAR-TERRESTRIAL PHYSICS. Syun-Ichi Akasofu y Sydney Chapman. Oxford University Press, 1972.

AURORA. A. Vallance Jones. D. Reidel Publishing Co., 1974.

MAJESTIC LIGHTS. Robert H. Eather. American Geophysical Union, 1980.

THE NORTHERN LIGHTS: FROM MYTHOLOGY TO SPACE RESEARCH. Asgeir Brekke y Alf Egeland. Springer-Verlag, 1983.

THE SOLAR WIND AND THE EARTH. Syun-Ichi Akasofu y Yosuke Kamide. D. Reidel Publishing Co., 1987.

Estrés vegetal inducido por metales pesados

Las plantas, en razón de su fisiología abierta al medio ambiente y su gran flexibilidad adaptativa, son un laboratorio excepcional de experimentación de la contaminación por metales pesados

Juan Barceló y Charlotte Poschenrieder

Un centenar de elementos químicos, aproximadamente, son los componentes naturales de la Tierra. De ellos, sólo la cuarta parte intervienen en la constitución normal de los seres vivos. En razón de sus propiedades físicas y químicas, los elementos ocupan lugares diferentes de la tabla periódica. Los metales, un conjunto muy destacado entre los elementos, están en la base de muchos materiales y procesos industriales y técnicos: metalurgia del hierro y del acero, cables de cobre, aleaciones, biocidas, plásticos, cementos, etcétera. Metales pesados son aquellos cuyo peso específico supera los cinco gramos por centímetro cúbico. Se trata de un grupo muy numeroso, que comprende unos dos tercios del total de elementos químicos naturales.

Desde un punto de vista biológico, los metales pesados están recibiendo gran atención debido a su potencial toxicidad. Aunque no suelen abundar en estado natural, salvo en zonas localizadas (minerías), por su interés industrial, el acúmulo de residuos y su concentración en los fangos de depuradoras están generando una notable y creciente contaminación antropogénica de la biosfera. Ante esa situación, las plantas constituyen un material idóneo para el estudio de las acciones de los metales pesados sobre los seres vivos; son sistemas abiertos a la comunicación (positiva o negativa) con su entorno y forman el primer eslabón de las cadenas tróficas en los ecosistemas.

JUAN BARCELO y CHARLOTTE POSCHENRIEDER trabajan en la cátedra de fisiología vegetal de la Universidad Autónoma de Barcelona, de la que el primero es director. Barceló se graduó en 1964 y doctoró en 1969 por la Universidad de Barcelona. Ha sido catedrático y director de los departamentos de fisiología vegetal de la Universidad Complutense de Madrid y de la Universidad de las Islas Baleares. En el departamento de fisiología vegetal de la Universidad de Freiburg (Alemania Federal) se especializó en las técnicas de fotomorfogénesis. Poschenrieder se graduó en 1978 y doctoró en 1980 por la Universidad Complutense de Madrid, ha sido profesora de la Universidad de las Islas Baleares y actualmente es profesora titular de fisiología vegetal en la Universidad Autónoma de Barcelona. Ambos investigadores están especializados en el estudio de la fisiología de las plantas en condiciones adversas, sobre todo referido a los estreses iónico, osmótico, hídrico y por irradiación ultravioleta.

Una típica planta superior se compone de un conjunto de órganos especializados (raíz, tallo y hojas). La raíz forma el sistema de fijación de la planta al medio que, además, permite, mediante su desarrollo continuo, la exploración del suelo en busca del agua y de los nutrientes minerales necesarios para su propia pervivencia. A diferencia de los animales y del hombre, en los que su capacidad de movimiento les lleva fácilmente a encontrar el lugar de nutrición adecuado o a evitar las situaciones desfavorables, la planta tiene un contacto más directo, abierto y limitado con su medio, sea éste el entorno de la rizosfera como el de la atmósfera.

En la parte aérea, las hojas forman el sistema más elaborado y complejo del metabolismo vegetal. Así, las plantas verdes por medio del proceso central de la fotosíntesis, desarrollado en los cloroplastos, convierten la energía de la luz en energía química, almacenada en moléculas que intervienen en la fijación y reducción del carbono, nitrógeno y azufre inorgánicos en diferentes compuestos orgánicos (azúcares, proteínas, lípidos). Entre el sistema radicular y el sistema foliar, el tallo tiene la función de sostén mecánico y de vía de transporte y distribución de los productos, por medio del xilema y floema. Por esta operación de conjunto, la planta capta del medio el agua y los nutrientes minerales por las raíces que luego el xilema distribuye a los demás órganos. A su vez, a través de los estomas de las hojas, capta el CO_2 atmosférico; en los cloroplastos, mediante la fotosíntesis, forma la materia orgánica (triosas, hexosas, sacarosa, etcétera) que, desde las hojas, el floema distribuirá al resto de la planta.

Se advierte, pues, la enorme importancia que tienen para la planta todos los cambios del entorno, sean normales o anormales. Cualquier variación anómala que provoque acciones negativas sobre la planta se convierte en un factor o situación de estrés. Las situaciones de estrés se resumen en los siguientes tipos: físico, químico y biológico. Son ejemplos de estrés físico el defecto o exceso de luz, radiaciones lesivas, alteraciones del espectro de luz, bajas o altas temperaturas y otros; producen estrés químico, entre otros, el exceso de ciertos iones y los cambios osmóticos o salinos; causa de estrés biológico son las infecciones por hongos, bacterias o virus, parasitismo animal o vegetal y otros de parecido tenor.

Otro concepto fundamental a retener es el de nutrición. En las plantas se admiten tres tipos diferentes de nutrientes: esenciales, beneficiosos y

1. EFECTO TOXICO de los metales pesados en la planta. En este caso, el cadmio transportado por el xilema desde el lugar de captación, las raíces, llega a las hojas. Obsérvese en esta microfotografía de barrido el menor diámetro de los conductos y las deposiciones en las paredes secundarias que obstruyen algunos vasos del xilema en tallos de judía contaminadas por cadmio (*arriba*), comparado con plantas control, sin tratamiento con cadmio (*abajo*).

tóxicos. Un elemento se considera *esencial* cuando las plantas lo requieren para sus procesos metabólicos o de regulación, sin que pueda otro elemento sustituirle en sus funciones. Hasta el momento, sólo se ha podido demostrar el carácter esencial de 16 elementos: C, H, O, N, S, P, K, Ca, Mg, Fe, Mn, Cu, Zn, Mo, B y Cl. Otros, como el Ni, son imprescindibles para las leguminosas, pero no para otras especies. Los elementos *beneficiosos* estimulan el crecimiento y desarrollo de las plantas. Este es el caso, en determinadas circunstancias y para ciertas especies vegetales, del Ni, Cr, Na, Si, V, Co y otros. Ahora bien, cualquiera de esas dos modalidades, a partir de cierta concentración crítica, y otros, ya en cantidades mínimas, son elementos *tóxicos*. Este último caso se presenta para el cadmio, plomo y mercurio, entre otros.

El estrés químico que los metales pesados provocan en las plantas ofrece una serie de aspectos que conviene examinar. Aunque el elemento químico que es esencial o tóxico para la planta suele serlo también para animales y hombre, se dan algunas desviaciones. Este es el caso del cromo, esencial para animales y hombre y no considerado como tal —al menos no demostrado hasta el momento— para las plantas. Otros metales pesados, de los que recordaremos el cadmio, plomo, mercurio y uranio, son permanentemente tóxicos. Por contra, en condiciones mínimas, resultan imprescindibles para la planta el hierro, manganeso, cinc y molibdeno. Se considera, por último, que cada elemento tóxico opera de forma distinta y peculiar. Los metales pesados distan, pues, de ser un grupo homogéneo.

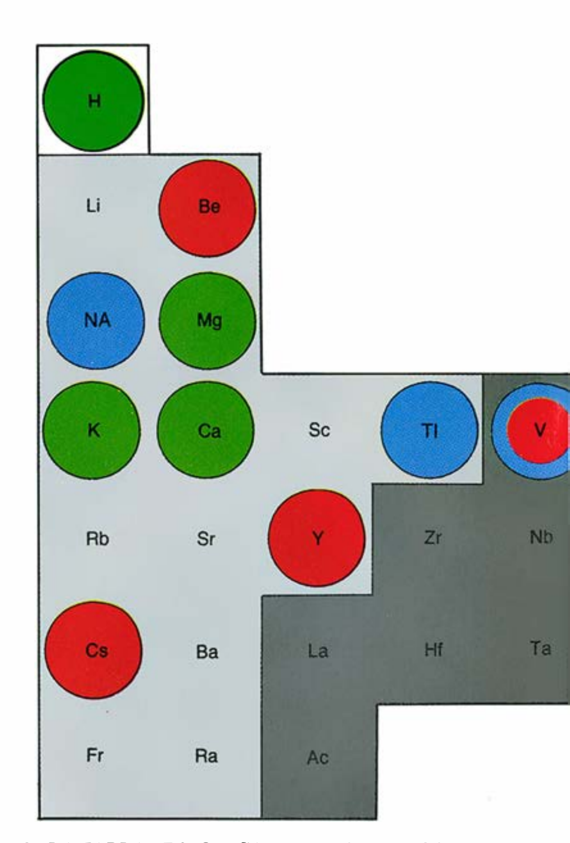
Los mecanismos de respuesta de las plantas, frente a la toxicidad por metales pesados, son así muy heterogéneos. Para una mejor comprensión, escogemos como modelos de estudio algunos metales (Pb, Cd, Al, Cr, Zn y Tc), representativos de la variedad de acciones y respuestas que inducen en las plantas. Los tres primeros por tratarse de elementos muy tóxicos, el Cr por las respuestas diferenciales que suscita, el Zn por ser un elemento esencial y el Tc por constituir un elemento, a la vez, metal pesado y radiactivo.

Antes de entrar en la exposición de esos modelos, conviene recordar ciertos datos relativos a las respuestas al estrés por metales pesados. En primer lugar la diferencia en el grado de sensibilidad o de resistencia al efecto tóxico del metal, que depende de un mecanismo genético evolutivo de adaptación selectiva; en segundo lugar, la existencia de varios niveles de acción de los metales pesados en la planta y la dificultad de distinguir entre los mecanismos primarios de acción (en membranas, pared celular o genético) de la serie de mecanismos secundarios que se disparan y que afectan a gran número de funciones de las plantas, lo que determina un sistema muy complejo de interacciones y de posibles ajustes internos; en tercer lugar, la capacidad de los metales de formar complejos estables con una amplia gama de ligandos orgánicos, lo que permite explicar determinados procesos catalíticos, su movilidad y transporte en planta, su secuestro en algún compartimento celular, así como algunas acciones tóxicas.

En cuarto lugar, conviene tener presente la participación activa del metabolismo celular en el sistema de transducción de las señales procedentes del medio exterior a la situación que se crea en el interior de la planta, que lleva a cambios fisiológicos muy diversos: pauta de crecimiento, distribución y balance de nutrientes, economía hídrica, respuestas hormonales y ajustes metabólicos y osmóticos.

Dado que, en la mayor parte de casos, la contaminación por metales pesados se produce o acumula en el suelo, la planta responde, desde el principio, en el mismo órgano receptor con una significativa reducción del crecimiento de la raíz. Este fenómeno supone una caída de la relación raíz/parte aérea, relación que muchas veces se aprovecha como índice comparativo en los estudios de tolerancia de las plantas a los metales pesados. Con carácter bastante general, los metales pesados se acumulan en la planta en concentraciones superiores a las del medio y, dentro de ella, la raíz es el órgano de máxima acumulación; pero el tecnecio 99 (metal pesado radiactivo) se acumula en las hojas mejor que en la raíz.

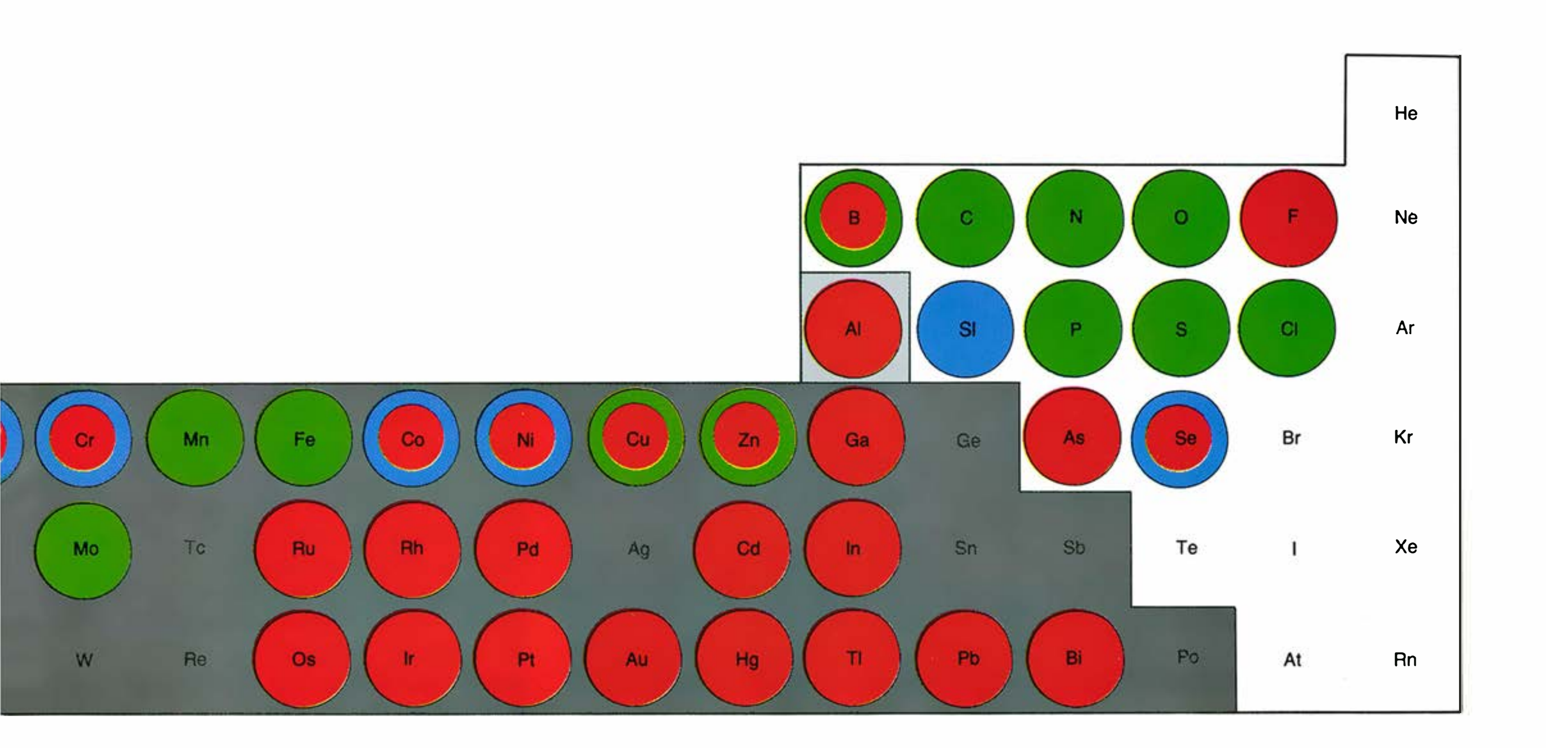
La situación inicial creada en la raíz con la intoxicación por metales pesados afecta sucesivamente al tallo y sobre todo a las hojas, en donde se produce una disfunción en el sistema de la compartimentación subcelular. Entre los orgánulos más dañados se hallan los cloroplastos y las mitocondrias; supone ello la alteración de los pigmentos fotosintéticos, que implica la disminución de la biosíntesis de las clorofilas, y un atentado contra la integridad del sistema de membranas y tilacoides. Los metales pesados pueden también inducir la formación de radicales libres, como es el caso del anión superóxido ($\cdot O_2^-$), lo que permitiría explicar, al menos en parte, los efectos lesivos sobre las membranas y el estímulo de la senescencia.



2. LA TABLA PERIODICA comprende un total de 103 elementos químicos. En la ilustración se representan todos, a excepción de la serie de los lantánidos y los actínidos. Obsérvese la gran abundancia de me-

En una fase más avanzada de alteración de la raíz y las hojas, se producen intensos cambios metabólicos y de regulación. Se desarrolla, finalmente, un proceso de estímulo de la senescencia por acumulación crónica del metal pesado, que puede resultar en la muerte de la planta.

A la hora de considerar el estrés químico de las plantas hay que tener en cuenta no sólo la causa productora —un metal pesado en el caso que nos ocupa—, sino también su situación en el entorno. Existe una relación abierta y directa de la planta, a la vez, con el suelo y la atmósfera que la rodea. De aquí que esta contaminación podrá llegar a la planta bien vía atmosférica directa, siendo en este caso la parte aérea (hojas fundamentalmente) el órgano receptor primario, o por medio de su presencia o deposición en el suelo. Para los metales pesados, este último caso suele ser el habitual, y la raíz es el órgano receptor primario.



tales y metaloides (*fondo gris*) frente a los no-metales (*fondo blanco*). El grupo de los metales pesados (*parte central*) corresponde a los elementos con peso específico superior a 5 g/cm^3. De todos los elementos químicos, sólo 16 se consideran esenciales para todas las plantas superiores (*verde*). Unos pocos elementos son beneficiosos o esenciales sólo para determinadas especies (*azul*). Entre los metales pesados hay algunos nutrientes esenciales de gran importancia metabólica, pero todos, incluso a concentraciones muy bajas (inferiores al milimolar) son fuertemente tóxicos si se hallan en forma disponible para las plantas.

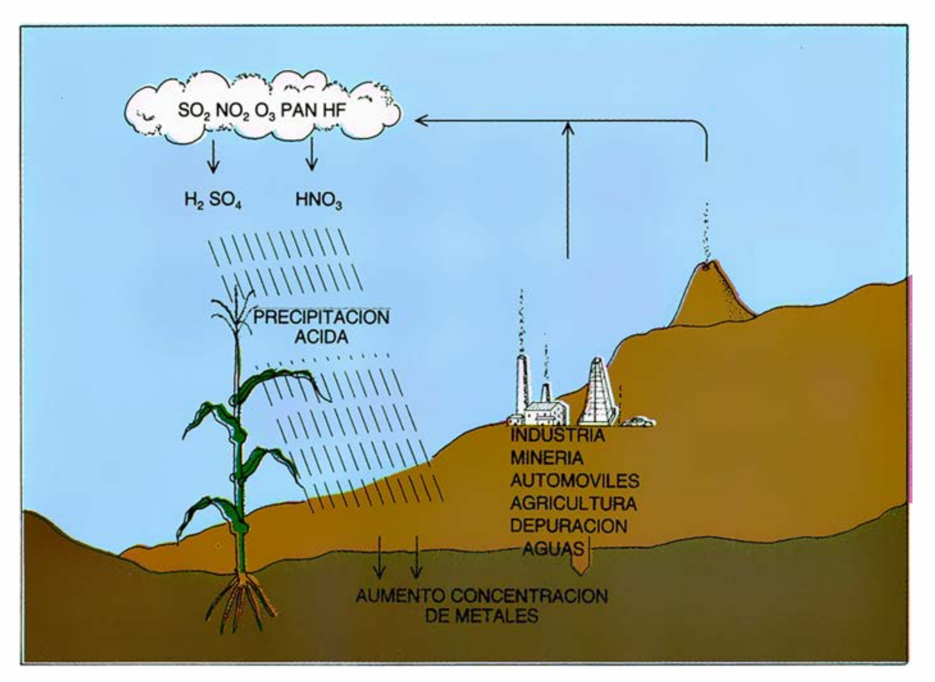
Las plantas absorben todos los elementos del suelo disponibles, es decir, los que se hallan en forma iónica soluble o intercambiable con las micelas del suelo; no así las formas insolubles o fijas. En esta disponibilidad intervienen factores edáficos que facilitan la solubilización del elemento en la solución del suelo o su retención lábil por adsorción a las micelas del suelo. (Llámase micela a las partículas coloidales del suelo). De esta forma se evita la lixiviación de los iones por el agua de filtración, y se permite una fácil cesión o suministro a la planta y a la solución del suelo por intercambio iónico. Debido al predominio de las cargas superficiales negativas en las micelas del suelo, este intercambio iónico es fundamentalmente catiónico: es decir, ocurre con los metales cuya ionización es catiónica. De aquí que esta disponibilidad y por tanto, en este caso, toxicidad dependerá no sólo de la presencia del elemento y de su cantidad total, sino también de la interacción de los factores edáficos y climatológicos que lleven o no a su disponibilidad.

Se consideran factores que favorecen la disponibilidad para la planta de los metales de un suelo el descenso del *p*H, la actividad de los microorganismos de la rizosfera, el tipo de especie química del metal presente en el suelo, las condiciones de óxido-reducción del microambiente edáfico, la presencia de sustancias orgánicas con capacidad complejante, la proporción y tipo de micelas orgánicas y diversos factores climáticos que potencian el estrés químico.

Los metales pesados, presentes en la contaminación atmosférica y en la del suelo, pueden ser un factor importante en el fenómeno de la lluvia ácida. En la atmósfera, los óxidos de nitrógeno (NO_x) y de azufre (SO_2) en presencia de sustancias oxidantes dan lugar a la formación de ácido nítrico (HNO_3) y ácido sulfúrico (H_2SO_4). Estos óxidos y ácidos de N y S, junto con el ozono y demás sustancias contaminantes atmosféricas (incluidos los metales pesados en suspensión) producen graves daños sobre las partes aéreas de las plantas, lesionan la protección lipídica de las superficies foliares, provocan una fuerte clorosis y necrosis en hojas y alteran el sistema de compartimentación por membranas, el metabolismo celular y el intercambio de gases con el exterior por modificación de las propiedades de los estomas y de la cutícula.

Después, por deposición seca o por arrastre por la lluvia se produce un descenso del *p*H del suelo (por debajo de 4,5). Este incremento de la acidez del suelo provoca la pérdida de cationes intercambiables (Ca^{++}, Mg^{++} y K^+) y la liberación del aluminio y metales pesados a la solución del suelo. De esta forma, el *p*H bajo determina un notable aumento en la disponibilidad de aluminio para las plantas, que así es fácilmente absorbido por las raíces. En ellas, ya a muy bajas concentraciones de aluminio, aparecen ciertos efectos: inhibición del crecimiento longitudinal de las raíces, inhibición de la división celular del ápice meristemático, distorsiones en el potencial de transmembrana e interferencia con la absorción, transporte y uso de varios nutrientes esenciales, sobre todo con Ca, Mg, K, P y Fe.

En parte ligado al problema anterior está la contaminación por plomo. Se trata de uno de los metales pesados más comunes. Si bien puede acumularse por causas naturales (meteorización de rocas y minerales, emisiones volcánicas y meteoritos) su concentración suele deberse a causas antropogénicas y está ligada, sobre todo, a ambientes urbanos. Significativas son las emisiones de plomo procedentes de la combustión de la gasolina y su influencia negativa sobre la vegetación cercana a



3. INTERCAMBIO ABIERTO DE LA PLANTA con el medio que la rodea. Por las raíces absorbe el agua y los nutrientes minerales del suelo, que, a través del xilema, distribuye al resto de la planta. Por los estomas, las hojas captan el CO_2 y liberan agua y oxígeno a la atmósfera. La materia orgánica elaborada por la fotosíntesis en los cloroplastos de las hojas se distribuye a través del floema. Los metales pesados pueden contaminar la atmósfera y el suelo. En el primer caso, hay una captación directa por los estomas y una deposición sobre las superficies de las hojas. La presencia natural o antropogénica de metales pesados en los suelos o su deposición seca o por arrastre húmedo (lluvia, nieve y rocío) da lugar a diferentes grados de disponibilidad de los metales para la planta, según sean la forma química del metal y las características del suelo: *p*H, cantidad y tipo de micelas inorgánicas (arcillas) y orgánicas (sustancias húmicas), propiedades de intercambio catiónico, textura y estructura y presencia de sustancias orgánicas complejantes en la rizosfera.

las autopistas. Se trata aquí de un caso característico de contaminación aérea directa, por las partículas en suspensión atmosférica, que alcanza también al suelo por deposición seca o por arrastre por la lluvia o nieve. El plomo depositado en el suelo, en su forma soluble, es captado por las raíces, donde se almacena, dada su escasa movilidad, mientras que la contaminación atmosférica daña directamente a las partes aéreas de las plantas, especialmente las hojas. De esta forma, por doble vía, raíz y hoja, las plantas pueden alcanzar niveles tóxicos del elemento. Se requieren concentraciones relativamente altas de este elemento para provocar toxicidad en las plantas. Se señalan valores de 1000 partes por millón de plomo en el suelo para que se resienta el crecimiento de las plantas. En plantas en situaciones de estrés se ven afectadas a concentraciones menores. No obstante, su peligro estriba en el fenómeno de acumulación en otros seres vivos a través de las cadenas tróficas. En todo caso, sólo una pequeña parte del plomo atmosférico es absorbido por la planta y el resto forma depósitos sobre su superficie, lo que constituye una grave amenaza de contaminación para los herbívoros al ingerir estos depósitos superficiales con las hojas.

En estos últimos diez años nuestro equipo de investigación viene trabajando intensamente en el estudio de los mecanismos de respuesta de las plantas a los metales pesados. Fruto de estas investigaciones son algunas aportaciones significativas a la hora de interpretar la fisiología o comportamiento de la plantas frente al estrés por metales pesados.

En primer lugar cabe ponderar la importancia de la pared celular. Así, en nuestros experimentos, plantas de judía (*Phaseolus vulgaris*) tratadas con cadmio o con cromo muestran respuestas diferenciales en las propiedades de elasticidad de la pared. En efecto, las plantas expuestas al cromo en su medio nutritivo muestran mayor elasticidad que las sometidas al cadmio. Para calibrar el interés de estos resultados hemos de resaltar que la pared celular está en la base de los mecanismos de crecimiento por extensión o elongación de la célula vegetal y de la regulación de las propiedades osmóticas y potencial de turgencia de la misma. Este hecho, junto con una regulación diferencial del grado de abertura de los estomas, explica el comportamiento distinto de una misma planta, según se halle sometida a un estrés por un metal u otro y la mayor resistencia al estrés hídrico en el caso de las plantas expuestas al cromo respecto a las contaminadas por cadmio.

Las poliaminas y el ácido abscísico son substancias reguladoras en situación de estrés vegetal; las poliaminas, ligadas a distintas fracciones del metabolismo celular (ácidos nucleicos y sustancias fenólicas), muestran una función protectora, principalmente en el caso de las plantas tratadas con cromo. El ácido abscísico, una hormona vegetal, actúa en la regulación adaptativa de las funciones hídricas y fotosintéticas de la hoja, por ajuste hidroactivo del cierre de los estomas en respuesta al estrés iónico provocado.

Se observan notables diferencias que afectan a la estructura y ultraestructura de la planta, según sea el metal y órgano considerado. Las alteraciones se manifiestan por lesiones en la superficie de las raíces, precipitados en las vacuolas y citoplasma de las raíces y tallos, daños en las membranas, especialmente en los tonoplastos de raíces y tallos, y alteración de la ultraestructura de los cloroplastos en las hojas trifolioladas.

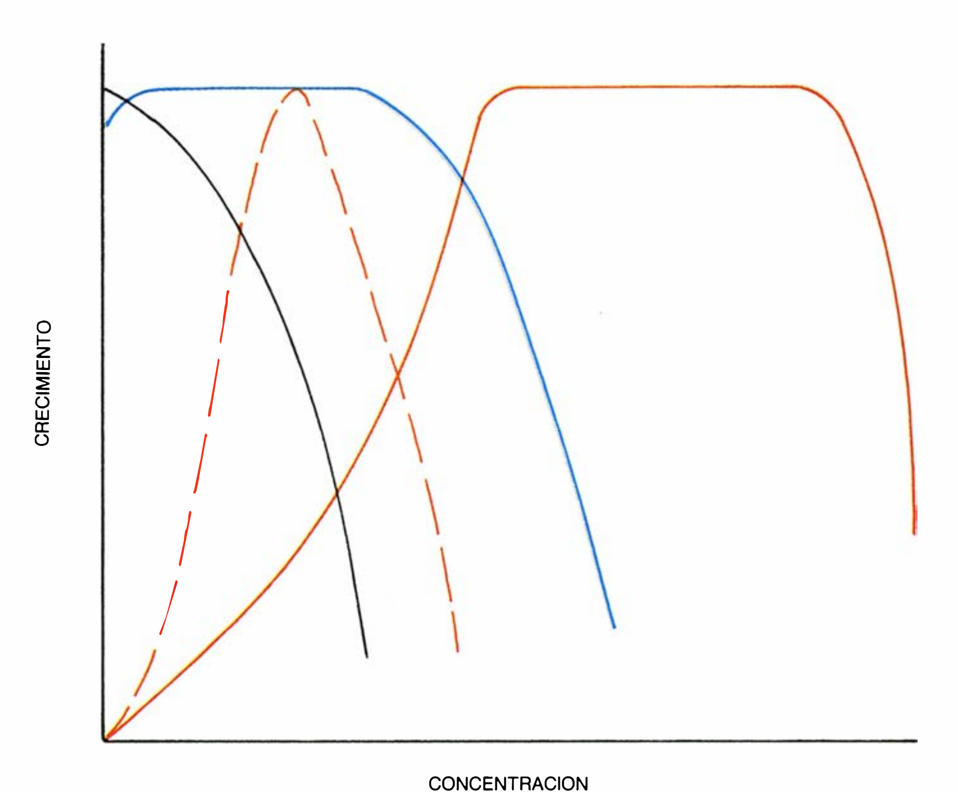
El cinc, manganeso y hierro son tres elementos metálicos esenciales para la vida de la planta que ésta requiere en cantidades traza (micronutrientes). Se trata de elementos de transición (Fe y Mn) o de propiedades cercanas (Zn). Los dos primeros actúan biológicamente por su facilidad o afinidad de interconversiones en procesos de óxido-reducción; todos ellos forman complejos de coordinación con diferentes compuestos orgánicos, participando en la activación de enzimas y en regulaciones alostéricas. En condiciones normales de concentración en un suelo, no son tóxicos para la planta, sino esenciales. Estos tres micronutrientes ejemplifican otro modelo de metal pesado, aquel que, siendo necesario e imprescindible para la planta, se torna tóxico cuando supera cierta concentración crítica, variable para cada uno de ellos. Acontece eso con el cinc. Sus efectos se manifiestan rápidamente en la planta por aparición de manchas, clorosis y necrosis, con cambios que afectan el metabolismo fotosintético, modifican la ultraestructura de los cloroplastos, inhiben la biosíntesis de los pigmentos fotosintéticos, inhiben el transporte de electrones fotosintético, amortiguan la actividad de la enzima Rubisco, disminuyen la producción de NADPH, inhiben el transporte de sacarosa, rebajan los niveles de algunos iones esen-

ciales e incrementan la producción de fenoles y ligninas.

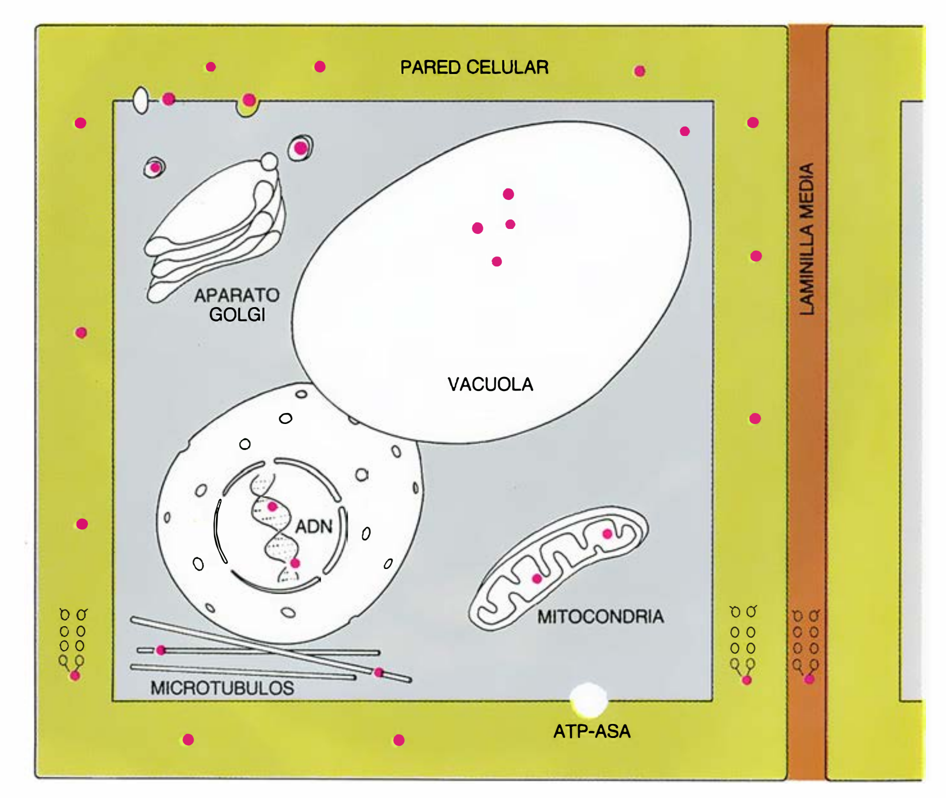
Un caso muy peculiar de metal pesado tóxico es el del tecnecio. Descubierto en 1937, se trata de un elemento radiactivo, de número atómico 43, del que se conocen 20 isótopos e isómeros, siendo el más significativo el Tc-99 que se puede formar de manera natural por fisión del U-238, aunque en proporciones muy bajas. En los procesos responsables de la emisión de Tc-99 al medio ambiente intervienen los productos de combustión en centrales nucleares, la explosión de armas atómicas y el uso de Tc-99 como marcador en medicina nuclear. De todas estas fuentes, la más importante son los procesos de combustión en centrales nucleares. Así se calcula que una central nuclear de 100 megawatt produce unos 2,5 gramos de Tc-99 al día. La vida media del Tc-99 es de 2,1 x 10^5 años.

De las diferentes formas químicas del Tc, el tecnetato (TcO_4^-) es la más disponible para la planta. Entre sus acciones o distorsiones fisiológicas, importa destacar su gran movilidad en la planta, lo que determina que el órgano de acumulación no sean las raíces sino las hojas, la inducción de determinados cambios en el balance de nutrientes de la planta (especialmente del calcio), cambios en la pauta de absorción del Tc-99 durante las distintas fases del desarrollo de la planta, interacciones del sulfato, fosfato y molibdato con el tecnetato; acciones muy complejas sobre el crecimiento de la planta que, a dosis pequeñas, producen estímulo para luego apenas manifestarse y llegar fácilmente de la inhibición inicial a muerte total de la planta, según sean las dosis consideradas. Asimismo, variedades distintas de una misma especie (*Phaseolus vulgaris*) muestran diferente sensibilidad.

Un campo de intensa investigación actual es el de la resistencia de las plantas a la toxicidad por metales pesados. Es un problema complejo porque algunas plantas son capaces de evitar o tolerar el estrés y en cambio otras, incluso dentro de una misma especie, no presentan resistencia. Dentro de una misma especie se observan ecotipos resistentes y otros que no lo son. Lógicamente, a la hora de plantear adecuadamente el problema, nos ha importado primero distinguir entre un tipo de plantas y otro, estudiar su comportamiento fisiológico e intentar llegar al conocimiento del mecanismo, es decir, conocer lo que se debe a la propia cons-



4. CURVAS DE CRECIMIENTO de una planta en función de la concentración del elemento químico. Obsérvese las diferentes pautas de crecimiento, según que el elemento sea macronutriente esencial (*línea continua marrón*), micronutriente esencial (*línea marrón a trazos*), elemento no esencial pero tolerable o beneficioso para la planta (*azul continuo*) o elemento tóxico (*curva negra*). Obsérvese también como cualquiera de estos elementos, a partir de cierta concentración, es tóxico. Los metales pesados obedecen, según los casos, a los distintos modelos con excepción del representado en línea continua marrón (macronutriente esencial).



5. MODELO DE CRECIMIENTO VEGETAL. Comprende la división celular (células meristemáticas) y el crecimiento en extensión. En el crecimiento en extensión intervienen la gran vacuola central, las características osmóticas, la permeabilidad de las membranas y las propiedades físico-químicas y mecánicas de la pared celular. Cualquier factor que actúe sobre uno de estos componentes (mitosis, regulación osmótica, permeabilidad de membranas o propiedades mecánicas de la pared celular) modificará el desarrollo vegetal. Los metales pesados producen una notable reducción del crecimiento de las plantas, sobre todo de las raíces.

titución y lo que viene determinado por la acción del medio.

No parece haber un mecanismo único de defensa de las plantas frente a todos los metales pesados. Eso resulta fácilmente explicable por la misma falta de uniformidad en las propiedades físico-químicas de los diferentes metales pesados. Se conocen distintas estrategias de las que se vale la planta para su defensa o adaptación, bien evitando, por exclusión, la entrada del metal tóxico o, en mecanismos más elaborados, volviéndose resistente al elemento tóxico en el "interior", por diversos procesos que, a su vez, pueden incluir la exclusión del metal pesado del metabolismo interior o la tolerancia a su presencia.

En los mecanismos por exclusión del metal tóxico, la planta logra evitar la toxicidad dificultando la absorción del elemento por diferentes mecanismos; por incremento de la resistencia de la membrana, ésta se opone a la captación del metal, como se ha descrito para el cobre y el cinc en algunas especies estudiadas; en otros casos, el cinc provoca una inhibición del mecanismo de absorción activa, impidiendo así su captura y acumulación interna. Las micorrizas, hongos en simbiosis con las raíces de las plantas, aparte de su función beneficiosa para la captación de agua y nutrientes, constituyen otro eficaz mecanismo de reducción del aporte del metal pesado tóxico a la planta.

Mucho más variadas son las posibilidades de los mecanismos de resistencia interior de la planta frente al metal tóxico. Entre ellos, la regulación de los espacios de compartimentación subcelular y las respuestas moleculares que tienden a contrarrestar al elemento en el interior celular. En el funcionamiento celular de una planta están presentes finos mecanismos de homeostasis, o equilibrio funcional, que tienden a mantener un balance de los nutrientes, metabolitos celulares y otras sustancias. La pared celular, hacia el exterior de la célula, y, en el propio interior, la gran vacuola central, que forma casi el 80 por ciento del volumen de una célula vegetal adulta diferenciada, son importantes lugares de regulación del "contenido" interior, metabólicamente muy activo, que representa el citosol y los diversos orgánulos (cloroplastos y mitocondrias, principalmente). En estudios con diversos tipos de plantas tolerantes, sobre todo en el caso del cinc y cobre, se ha podido comprobar que la tolerancia es interna, y que esos elementos acaban en la pared celular o en el interior vacuolar. Se desconocen los mecanismos que producen el eflujo o salida del metal tóxico desde el citosol para mantener el balance homeostático.

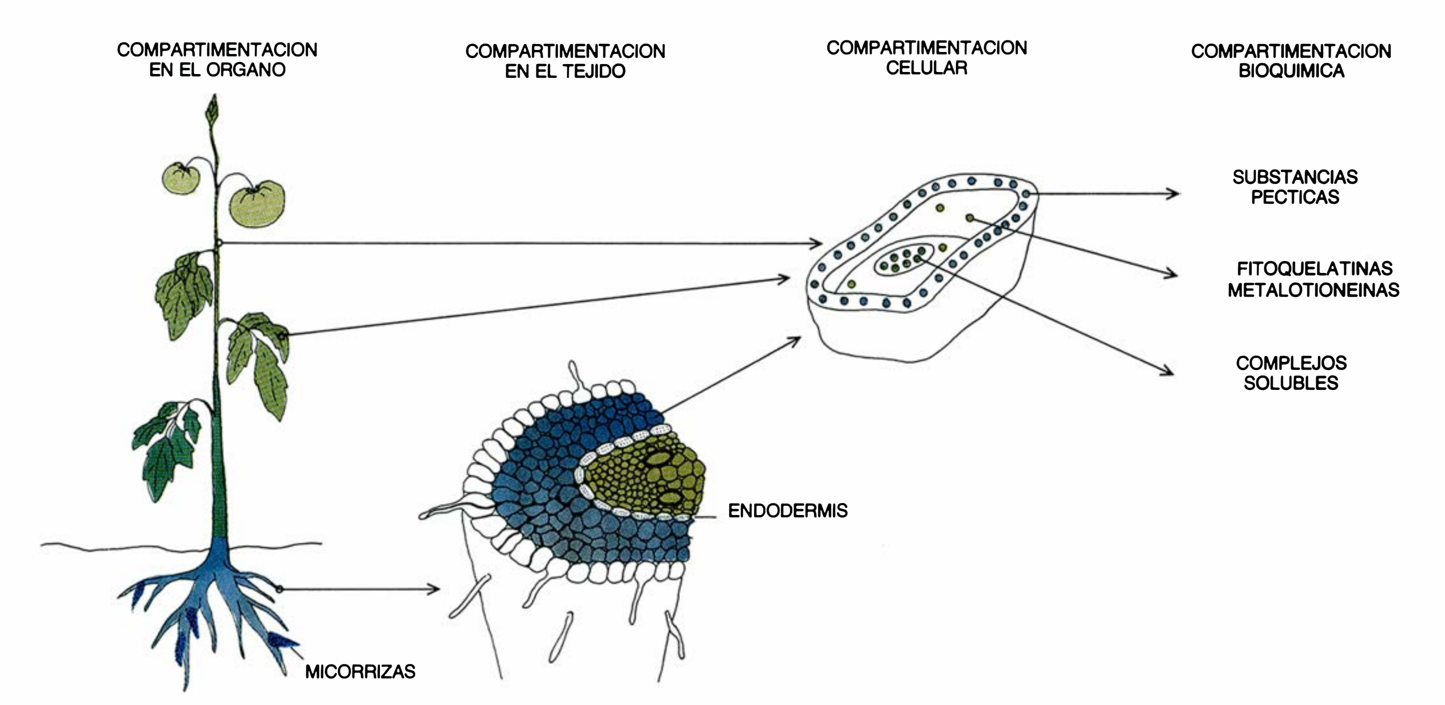


6. LA RAIZ es el órgano receptor primario del estrés por metales pesados del suelo y el lugar principal de acumulación. Los metales pesados retardan la diferenciación celular y producen plasmolisis en las células periféricas de la raíz y agregación de constituyentes celulares. La foto muestra un detalle de un núcleo de una célula del córtex de la raíz de una planta de judía tratada con cadmio. Obsérvese la cromatina muy condensada en formas irregulares. (Foto de M.ª D. Vázquez, del laboratorio de fisiología vegetal de la Universidad Autónoma de Barcelona, obtenida con el microscopio electrónico de transmisión de ese centro.)

Merecen un interés especial los mecanismos de inmovilización o inactivación interna del metal tóxico en el interior celular. A través de ellos, la planta localiza al elemento tóxico y dificulta su acción, movilidad y distribución, como es el caso del Cr, que se acumula en la raíz y se le dificulta su acceso a la parte aérea; más eficaz resulta la unión del metal tóxico, formando diferentes complejos con sustancias orgánicas, con grupos funcionales con N, S y O, que provocan su secuestro o inmovilización metabólica.

Ultimamente ha suscitado mucho interés la posible existencia de metalotioneínas vegetales (conocidas ya en los mecanismos de destoxificación de los metales pesados en los animales). Se trata de proteínas de bajo peso molecular (por debajo de 10 kilodalton), con un alto contenido en cisteína que forman complejos de destoxificación con diversos metales pesados, sobre todo, con Hg, Cd, Zn, Cu, Co y Ni en los animales. En estudios con levaduras y algunos hongos se ha podido comprobar también la existencia de las metalotioneínas para el Cu. Por el momento, los datos referidos a plantas superiores son mucho más problemáticos, dado que no hay unanimidad a la hora de interpretar los resultados disponibles. Estas proteínas similares a las metalotioneínas han sido señaladas por algunos investigadores referidas al cobre y cadmio.

Desde 1985, se conoce la existencia



7. EN LA TOLERANCIA DE LAS PLANTAS a los metales pesados la compartimentación del exceso tiene mayor importancia que la exclusión o la restricción de su absorción. En las plantas, la concentración de los metales suele seguir el orden decreciente: raíz >> tallo > hojas > frutos. Los metales, en gran proporción, son excluidos de la estela (barrera endodérmica), lo que limita su transporte a las partes aéreas. En el plano celular, los metales pueden excluirse del protoplasto por acumulación en la pared. La acumulación en la vacuola implica el paso de los metales por el citoplasma, por lo que debe haber mecanismos de tolerancia citoplasmática. Pero la tolerancia de enzimas frente a altas concentraciones de metales pesados no parece ser una estrategia generalizada.

en plantas superiores de otro modelo más simple de polipéptidos: las fitoquelatinas. Se trata de péptidos de unión del Cd, de peso molecular muy bajo, constituidos por unidades repetitivas de $(\gamma\text{-glutamilcisteinil})_n$ y glicina terminal, con valores de polimerización (n) que oscilan, según los casos (*Rauwolfia serpentina*, tabaco, tomate), entre 3 y 8. En otros casos, *Agrostis gigantea*, por ejemplo, hay ligeras variaciones en la composición del péptido, con aparición adicional del aminoácido serina.

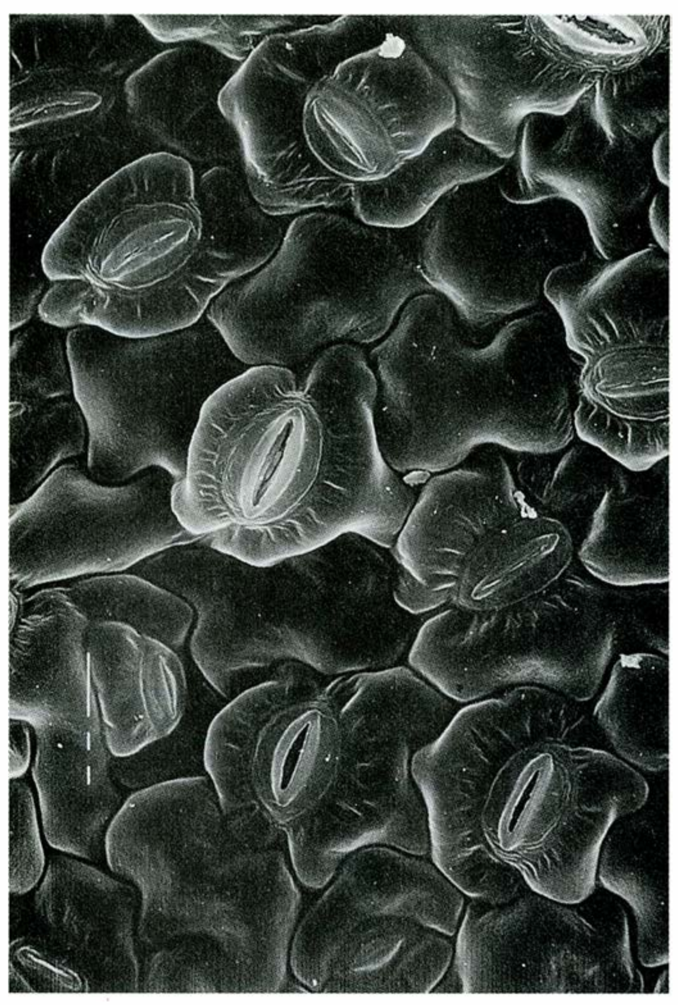
Por el momento es muy difícil interpretar el valor funcional de las fitoquelatinas y de las proteínas parecidas a las metalotioneínas. Para las metalotioneínas se ha objetado que su función primaria podría no ser la de destoxificación de metales pesados, sino que intervendrían en la modulación del metabolismo intermediario, en la regulación y transferencia de los metales a los apoenzimas y, subsidiariamente, protegerían a la célula de la toxicidad crónica del Cd y, posiblemente, del Cu y Zn. También se ha señalado que su función primaria podría estar relacionada con el control intracelular del metabolismo de los micronutrientes esenciales y con el control homeostático de iones metálicos, en respuesta a cambios de concentración en el medio exterior. Asimismo, no se acepta de un modo general la existencia en plantas superiores de las metalotioneínas; para algunos, podría tratarse de fitoquelatinas, que, por su mayor sencillez y su capacidad de unirse a metales pesados, constituirían un mecanismo muy rápido y flexible de acción. Obviamente se requiere mucha más investigación y de mejores caracterizaciones moleculares (estructurales, enzimáticas y genéticas) para poder establecer un mecanismo general fiable.

Las metalofitas, plantas adaptadas a suelos ricos en metales pesados, han sido objeto de particular atención, ya que su estudio puede aportar conocimientos sobre los mecanismos naturales que están en la base de la adaptación de estas plantas al estrés químico por metales pesados. Medran en suelos serpentinos y en terrenos de explotación minera. En los suelos serpentinos las plantas no tolerantes muestran muy baja productividad, debido a su bajo contenido de nutrientes (especialmente, de N, P y K), una proporción descompensada de la relación Ca/Mg con descenso del Ca respecto al Mg, y un alto contenido en determinados metales pesados: Ni, Cr o Co.

No se puede todavía extraer leyes generales sobre el comportamiento y las características de las plantas metalofitas. Se acepta que la evolución de la tolerancia a los metales pesados puede, en algunos casos, ser un proceso rápido. Este hecho se considera importante ante el creciente aumento de nuevos lugares de contaminación antropogénica por metales pesados (minerías, metalurgia, fundiciones, biocidas, fabricación de pigmentos, tenerías, residuos urbanos, fangos de depuradoras y productos de la combustión industrial). Al mismo tiempo, estas zonas permiten hacer estudios de campo y seguir la evolución de la tolerancia de las plantas a corto y medio plazo.

En los casos de colonización por plantas de terrenos ricos en metales pesados durante miles de años, se ha comprobado la presencia, a la vez, de plantas endémicas y otras de procedencia externa. La interpretación de los hechos no es unánime, si bien se admite la posible existencia de paleoendemismos (especies relictas, antes de amplia distribución y ahora restringidas a determinadas áreas) y neoendemismos (especies originadas en ciertas áreas en respuesta a determinadas condiciones medioambientales).

Se presta mucho interés al componente genético de la sensibilidad de la planta a los metales pesados, a su potencial variabilidad genética (que permite la selección adaptativa) y a las condiciones del medio donde vive la planta, tanto en situaciones normales como en las circunstancias adversas o




8. EPIDERMIS DEL ENVES de hojas de judía (*Phaseolus vulgaris*) de plantas control (sin suministro de cadmio), a la derecha, y en plantas contaminadas con cadmio, a la izquierda. Ese elemento provoca el cierre de los estomas y altera el recubrimiento lipídico de las superficies foliares. Distorsiona también el metabolismo del ácido abscísico que actúa como mensajero químico y provoca el cierre hidroactivo de los estomas. No se puede descartar, además, una acción directa del cadmio sobre las características osmóticas de las células guarda de los estomas. La alteración de la economía hídrica de las plantas, aunque debe considerarse un efecto secundario de la toxicidad por metales pesados, puede influir negativamente en la productividad y en la supervivencia de las plantas, especialmente en ambientes secos. (Foto obtenida con el microscopio electrónico de barrido por M.ª D. Vázquez, de la Universidad Autonóma de Barcelona.)

extremas. Muy ligado a lo anterior está la observación de la existencia de especificidad e independencia de la tolerancia de la planta para cada uno de los diferentes metales pesados. Así, se cree que es poco probable la existencia de un sistema único general, no específico, de destoxificación. No obstante, en suelos contaminados con varios metales pesados se ha comprobado que las plantas presentan una tolerancia múltiple. Sólo en algun caso se ha observado cotolerancia (tolerancia a un metal no presente producida por otro presente).

La presencia de un estrés hace normalmente más susceptible a la planta a otras tensiones (hídrica, nutritiva, bajas temperaturas y biótica). En estas interacciones, apenas conocidas, se describen fenómenos de sinergismo (combinaciones que incrementan los efectos fisiológicos, normalmente negativos en este caso) y de antagonismo (que contrarrestan y disminuyen el efecto negativo). En general, los costes energéticos para la adaptación de la planta al estrés son muy altos. Las plantas resistentes son menos capaces de competir y sobrevivir en ambientes normales, en los que no se presenta la presión del estrés.

Muchas plantas actúan como hiperacumuladores del metal pesado; ocurre eso, por ejemplo, a propósito del níquel en suelos serpentinos. Otras especies son bioindicadoras por cuanto retienen selectivamente un metal pesado y permiten así reconocer la presencia del mismo en un suelo. Entre estas últimas, citaremos *Polycarpaea spirostyles* y *Becium homblei* para el Cu, *Viola calaminaria* para el Zn, *Eriogonium ovalifolium* para la Ag y especies de *Alyssum* para el Ni. Por su peculiar biología, los musgos y los líquenes actúan de verdaderos sumideros de la contaminación por metales pesados. Este hecho está provocando un fuerte cambio en la pauta de esta flora en las zonas industriales y polucionadas, incluido el cambio de color de la pátina de nuestras catedrales.

A modo de conclusión destacaría algunos hechos. En primer lugar, la importancia creciente, por causas antropogénicas, de la contaminación por metales pesados y el puesto central de las plantas como puerta principal de entrada y acumulación de los metales tóxicos en los seres vivos. Su absorción por las plantas desencadena una serie de procesos fisiológicos de índole negativa, a los que sólo algunas plantas se han podido adaptar y adquirir resistencia. Esta contaminación vegetal alcanza a los animales y, en definitiva, al propio hombre, el cual, en la mayoría de los casos, constituye la causa de la producción o incremento de esta contaminación. De aquí que no sea un pro-

blema solamente científico, sino que tiene importantes implicaciones sociales, de gestión política y de ética de comportamiento. Ello debe llevar al cumplimiento y aplicación de una legislación más estricta de protección del medio ambiente y una mayor conciencia individual y social sobre los riesgos.

Desde un punto de vista científico, la investigación habrá de avanzar en el estudio de la heterogeneidad de los metales pesados y su toxicidad, que permita conocer el mecanismo primario de acción molecular. Algunos datos comprometen a la pared celular y las membranas. En todo caso, no parece haber un mecanismo único, sino especificidades por elementos, aunque éste es todavía un campo abierto al estudio. La célula vegetal muestra un rico metabolismo que requiere una compleja regulación entre los diferentes compartimentos separados por biomembranas. Características muy destacadas de esta coordinación son el mantenimiento de la homeostasis y su flexibilidad adaptativa. El sistema de biomembranas, los espacios vacuolares y de la pared celular, el flujo de la información, la variabilidad genética y la plasticidad fenotípica están en la base de los mecanismos de adaptación al estrés, al tiempo que permiten explicar la facilidad con que se producen múltiples cambios secundarios y la aparente inespecificidad de la acción.

Para ciertos tipos de estrés (calor o hipoxia) se conocen los mecanismos de regulación de la actividad génica responsables de la transcripción, que conducen a la síntesis de proteínas específicas de la situación de estrés. Menos se sabe sobre los metales pesados. ¿Hay regulación diferencial de la actividad génica específicamente por los metales pesados? Caso de haberla, ¿en qué grado se integra en un mecanismo de regulación general del estrés? ¿Cuál es la relación relativa de esta regulación génica con respecto al todavía hipotético mecanismo primario? ¿Cuál es el posible alcance general de las fitoquelatinas y de proteínas similares a las metalotioneínas?

En condiciones naturales, es la planta entera la que sufre la agresión o situación de estrés. De aquí la necesidad de impulsar estudios y modelos de experimentación para descubrir los mecanismos fisiológicos que están en la base del estrés (recepción del impacto, alteraciones funcionales, metabólicas y hormonales) que nos pueden ayudar a una mejor comprensión de las causas de la especificidad, desarrollo o no de resistencia, multiplicidad de respuestas y mecanismos por los que opera.

Los metales pesados causan un desequilibrio de los nutrientes internos de la planta. De los iones minerales, el K^+, Ca^+ y Mg^{++} se cuentan entre los más afectados, lo que explicaría en parte la amplitud y diversidad de procesos metabólicos que subsidiariamente son alterados. La variación en el balance celular de sustancias orgánicas determina una modificación en la relación funcional entre los órganos productores y los consumidores, lo que a su vez origina una brusca variación en el reparto de asimilados en la planta. Determinados reguladores del crecimiento (ácido abscísico y poliaminas) son factores de regulación en la nueva integración y coordinación creada por la situación que ha provocado el estrés. ¿Se trata de procesos de significación secundaria, meras consecuencias de alteraciones severas centrales o bien tienen una clara significación adaptativa para la coordinación interna del funcionalismo de la planta? Las metalofitas son un laboratorio natural, de un valor potencial todavía por descifrar, para el estudio de los mecanismos de respuesta de las plantas frente a los metales pesados. Más aún, constituyen un experimento natural sobre la sucesión de poblaciones y comunidades bajo la presión selectiva de metales tóxicos.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

UMWELTBELASTUNG DURCH MINERALSTOFFE. BIOLOGISCHE EFFEKTE. W. H. O. Ernst y E. N. G. Joose Van Damme. Gustav Fischer Verlag, Stuttgart; 1983.

INHIBITION OF PHOTOSYNTHESIS BY HEAVY METALS. H. Clijsters y F. Van Assche en *Photosynth. Res.*, vol. 7, págs. 31-40; 1985.

MOLECULAR BIOLOGY OF METAL TOLERANCE OF PLANTS. A. B. Tomsett y D. A. Thurman en *Plant Cell Environ.* vol. 11, págs. 383-394; 1988.

INFLUENCE OF CADMIUM ON WATER RELATIONS, STOMATAL RESISTANCE AND ABSCISIC ACID CONTENT IN EXPANDING BEAN LEAVES. Ch. Poschenrieder, B. Gunsé y J. Barceló en *Plant Physiology*; 1989 (en prensa).

GROWTH UNDER STRESS: HEAVY METALS. S. W. Breckle. En *Plant Roots - The Hidden Half* ed. Y. Waisel, A. Eshel y U. Kafkafi. Marcel Dekker inc., New York; 1989 (en prensa).

SYNERGISM BETWEEN CADMIUM-INDUCED ION STRESS AND DROUGHT. J. Barceló, Ch. Poschenrieder, M. D. Vázquez y B. Gunsé, en *Plant and Pollutants in Developed and Developing Countries*, M. Öztürk edit., Ege University, Izmir; 1989 (en prensa).

Ranas marsupiales

Algunas ranas tropicales incuban los huevos en su dorso, a menudo en una bolsa especial. Ciertos rasgos de esta adaptación recuerdan la gestación en los mamíferos y los huevos y embriones de las aves, pero otros les son exclusivos

Eugenia M. del Pino

Los mamíferos dan a luz crías vivas y las amamantan; las aves ponen huevos y los incuban. Las ranas, que son anfibios, depositan sus huevos en el agua y tienen larvas acuáticas, los renacuajos. Tal como estas generalizaciones sugieren, un modelo común de reproducción engloba la diversidad morfológica dentro de una determinada clase de animales, emparejando murciélagos con elefantes, colibríes con avestruces.

En las pluviselvas y montañas de América central y Sudamérica tropical viven unas 60 especies de ranas arborícolas que contradicen este axioma. Llegadas al estado adulto, se parecen a otras ranas arborícolas; sin embargo, su modo de reproducción difiere del característico de las demás ranas. Sus huevos no se desarrollan en el agua, sino sobre el dorso de la madre, frecuentemente dentro de una bolsa especial. En muchas especies, las crías salen transformadas en ranitas plenamente desarrolladas; en otras, como renacuajos avanzados.

Este insólito tipo de reproducción ha requerido algunas especializaciones notables. Protegido en el dorso de la madre, el embrión crece a un ritmo pausado. A su vez, el desarrollo prolongado significa que deben suministrársele nutrientes y que necesita intercambiar gases y fluidos con su ambiente. Todo ello ha exigido cambios en la fisiología de la madre, en la estructura y en las características moleculares del huevo, así como en el patrón de desarrollo embrionario. Muchas de estas especializaciones invitan a hacer comparaciones entre las ranas que incuban huevos y otros animales que, desde el punto de vista evolutivo, se hallan muy alejados.

La bolsa, por ejemplo, recuerda el marsupio de los marsupiales. La estructura interna de la bolsa de las ranas y los controles hormonales que gobiernan la incubación son paralelos a los mecanismos anatómicos y hormonales de la gestación en los mamíferos. El huevo grande y repleto de vitelo parece más aviar o reptiliano que propio de una rana, al igual que ocurre en determinados aspectos de su desarrollo embrionario. Sin embargo, en otros aspectos de su reproducción las ranas incubadoras no conocen par, lo que nos recuerda que los paralelismos con otras clases de animales no obedecen a la evolución a lo largo de una misma línea de descendencia, sino que son resultado de una convergencia evolutiva, que une cientos de millones de años de historia separada.

EUGENIA M. DEL PINO nació en Quito y es profesora de biología en la Pontificia Universidad Católica del Ecuador (PUCE). Obtuvo su licenciatura en ese centro y se trasladó a los Estados Unidos de América para completarla en el Vassar College en donde obtuvo una maestría en 1969. Se doctoró por la Universidad de Emory en 1972; ese año volvió a Ecuador para incorporarse a la PUCE en Quito. Durante el bienio 1984-1985 disfrutó de una beca de la Fundación Alexander von Humboldt, que le permitió trabajar con Michael F. Trendelenburg en el Centro Alemán de Investigaciones del Cáncer en Heidelberg. En 1987 Eugenia del Pino fue elegida miembro de la Academia de Ciencias de América Latina; siendo hasta la fecha el único miembro ecuatoriano de dicha institución.

En 1972, año en que empecé a enseñar en la Pontificia Universidad Católica del Ecuador en Quito, las insólitas características de la reproducción de las ranas incubadoras se conocían sólo a grandes rasgos. Para mí, estas ranas no eran más que una curiosidad de libro de texto. Sin embargo, poco después de instalarme en la capital de la nación descubrí que una especie de rana marsupial, *Gastrotheca riobambae*, vivía en los jardines de la universidad. Comencé a estudiar la rana y su modo de reproducción, y busqué ejemplares de otras especies incubadoras.

G. riobambae es una de las pocas especies de ranas incubadoras (o de cualesquiera otras ranas) que han conquistado el ambiente altimontano de Quito, que se halla cerca de los 3000 metros sobre el nivel del mar. La mayoría de ranas incubadoras viven en la bóveda arbórea de las selvas tropicales de las tierras bajas de Ecuador y de otras zonas de América del sur y central. Para estudiar estas especies me basé en ejemplares de museo y tuve la ayuda de William E. Duellman, Linda Trueb, John Simmons y otros investigadores del Museo de Historia Natural de la Universidad de Kansas, que recolectaron individuos vivos y los trajeron a mi laboratorio.

La pluviselva tropical, donde las ranas incubadoras adquieren mayor diversidad, constituye, posiblemente, el lugar donde evolucionaron. Es fácil imaginarse qué presiones de selección en la pluviselva pudieron favorecer la evolución del mecanismo de incubación de huevos. El gran número de especies de ranas en la selva tropical desata una intensa competencia por los sitios de reproducción. (En sólo tres kilómetros cuadrados de selva cerca de Santa Cecilia, Ecuador, Duellman y su alumna Martha L. Crump encontraron 81 especies de ranas, ¡casi tantas cuantas viven en toda Norteamérica!) Además, numerosos depredadores amenazan los huevos y larvas que aquéllas dejan sin protección en charcas y arroyos.

En consecuencia, muchas especies de ranas tropicales han adoptado nuevos lugares para depositar sus huevos. Algunas especies lo hacen en las hojas de las plantas sobre charcas y ríos; la lluvia arrastra, hacia el agua, a los renacuajos recién eclosionados. Otras ranas esconden sus huevos bajo la hoja-



1. EL MARSUPIO REPLETO DE EMBRIONES en desarrollo ha abultado a una rana marsupial de Ecuador (*arriba*), *Gastrotheca riobambae*. Después de dar a luz unos 218 renacuajos a través de la abertura del marsupio, en la parte inferior del dorso, la rana ha recuperado su tamaño normal (*abajo*).

rasca del suelo del bosque; los huevos dan origen directamente a pequeñas ranitas. El sistema más complejo de incubación de los huevos en el dorso de la madre se desarrolló en una subfamilia de los Hílidos (o ranas arborícolas): los Hemifractinos.

Se trata de un acontecimiento antiguo. Brian E. Scalan y Linda R. Maxson, de la Universidad de Illinois en Urbana-Champaign, en equipo con Duellman, han seguido la pista temporal de la evolución de las ranas arborícolas incubadoras, mediante la comparación de las secuencias de aminoácidos de determinadas proteínas en distintas especies. Si suponemos que las secuencias proteínicas han cambiado a un ritmo constante en el transcurso de la evolución, la diferencia entre dos secuencias dadas será proporcional a la distancia evolutiva entre los dos organismos, es decir, al tiempo transcurrido desde que ambos compartieron por última vez un antepasado común. La comparación de proteínas sugiere que las estirpes empezaron a divergir hace de 40 a 80 millones de años. Presumiblemente, la incubación de los huevos había aparecido ya en la estirpe ancestral.

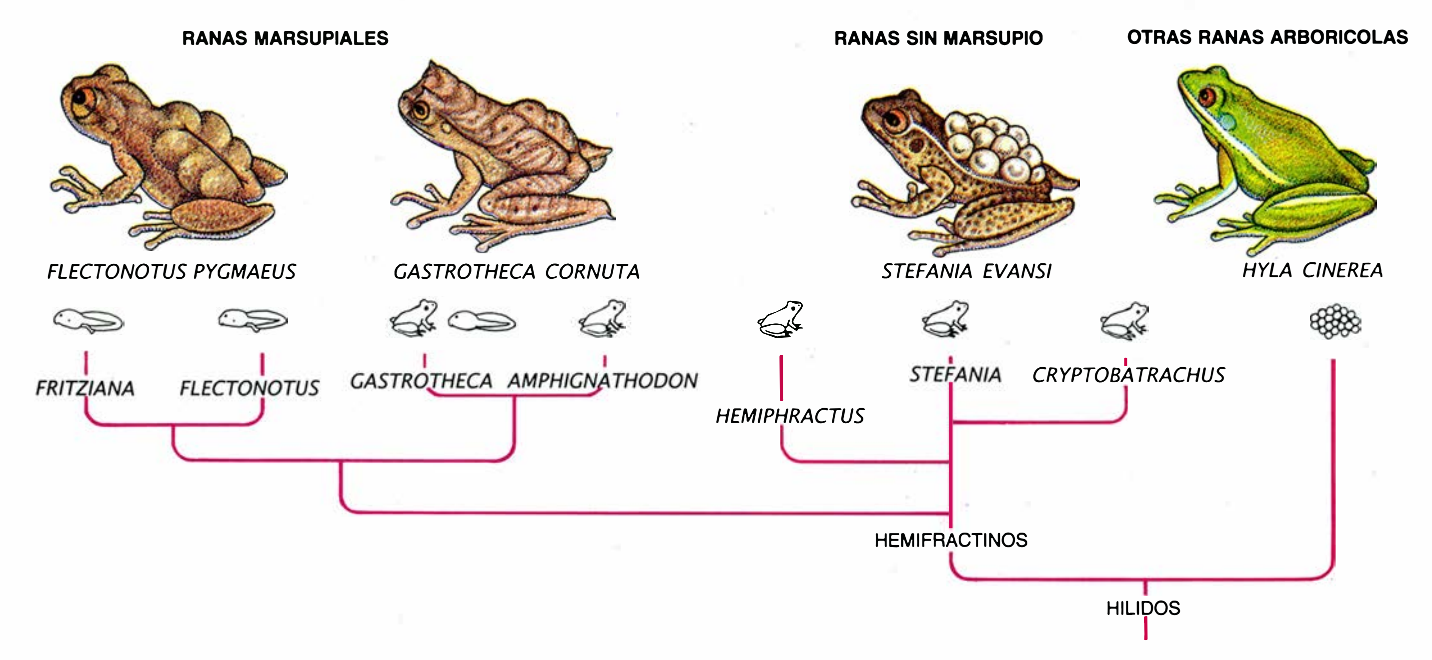
Hoy existe una amplia diversidad entre los siete géneros (que comprenden unas 60 especies) de ranas incubadoras. Tres de los géneros (*Stefania, Cryptobatrachus y Hemiphractus*) carecen de bolsas; los huevos se adhieren al dorso de la madre, donde se desarrollan y eclosionan en forma de ranitas. Otros cuatro géneros (*Fritziana, Flectonotus, Gastrotheca y Amphignathodon*) son verdaderas ranas marsupiales, dotadas de marsupio. Me centraré en los rasgos reproductores de estas especies marsupiales.

Las variaciones en el diseño de la bolsa incubadora en los diferentes géneros sugieren que ésta pudo haberse originado de pliegues longitudinales de la piel dorsal. Por ejemplo, en algunas especies de *Fritziana* los embriones en desarrollo están protegidos solamente por los pliegues laterales; en lo demás, se hallan expuestos. Los pliegues de otras especies de *Fritziana* y del género *Flectonotus* se juntan en la parte media del dorso, encerrando a los embriones en una bolsa derivada de dos compartimientos laterales. La bolsa se ha hecho más compleja en *Amphignathodon* y en muchas especies de *Gastrotheca*: conserva todavía dos cámaras laterales, pero su abertura se halla ahora situada muy hacia atrás en el dorso, por delante de la cloaca (la abertura reproductora y excretora común). Las especies altimontanas de *Gastrotheca* (y entre ellas *G. riobambae*) poseen lo que puede ser la forma más avanzada de marsupio, con las dos cámaras laterales fusionadas en una sola.

La evolución del marsupio acarreó nuevos comportamientos reproductores. Las ranas copulan mientras la hembra pone los huevos, que se van fecundando a medida que van emergiendo de su cloaca. En la mayoría de ranas el acoplamiento acontece en el agua, donde se abandonarán los huevos. Las ranas marsupiales se aparean en tierra, pero se enfrentan con un nuevo problema: cómo conseguir que los huevos pasen de la cloaca a la bolsa.

En las tres o cuatro especies en las que se ha observado el comportamiento de cópula, es el macho el que efectúa la transferencia. Así, durante el encuentro sexual en *G. riobambae*, el macho trepa al dorso de la hembra y abre el marsupio con sus patas posteriores. A medida que los huevos emergen de la cloaca de la hembra, al ritmo de uno o dos por minuto, el macho ase los huevos uno a uno con sus patas traseras y los introduce en el interior de la bolsa; durante el recorrido, el huevo es fecundado por el esperma que el macho ha depositado sobre el dorso de la hembra. El proceso continúa hasta que, por término medio, se han acomodado 130 huevos en el marsupio. A continuación, la hembra aprieta el dorso contra una piedra para hacer que los huevos se distribuyan en varias capas uniformes.

En muchas especies marsupiales transcurren varios meses antes de la eclosión de los huevos. Para salir de la bolsa, las crías (renacuajos avanzados en *Fritziana, Flectonotus* y algunas es-



2. RANAS INCUBADORAS DE HUEVOS, los Hemifractinos, que forman una subfamilia de las ranas arborícolas, de la familia Hílidos. Apoyándose en comparaciones de las proteínas de las ranas incubadoras y de características de la reproducción, William E. Duellman, del Museo de Historia Natural de la Universidad de Kansas, y Richard J. Wassersug, de Dalhousie, propusieron las relaciones evolutivas que se muestran aquí. Tres de los siete géneros carecen de marsupio; los embriones se adhieren al dorso de la madre. Los géneros también se distinguen en razón de los embriones: si nacen constituidos en ranitas o en forma de renacuajos avanzados (*dibujitos*). En un género (*Gastrotheca*) la forma al nacer varía de una especie a otra. Las ranas no se han dibujado a escala.







3. COMPORTAMIENTO REPRODUCTOR UNICO asociado a la incubación de la puesta. Durante el encuentro sexual en una especie marsupial, *Gastrotheca riobambae*, la hembra pone los huevos mientras el macho la sujeta por detrás e inserta los dedos de las patas traseras en el interior de la bolsa (*dibujo de la izquierda*). A medida que los huevos van emergiendo, uno a uno, de la cloaca elevada de la hembra, el macho los va introduciendo en el marsupio: los huevos son fecundados por esperma que el macho ha depositado previamente en el dorso de la hembra. En el transcurso de varias horas, se transfieren 100 o más huevos. El desarrollo embrionario dura más de tres meses, y deja a la madre tan hinchada que tiene dificultades para moverse (*dibujo del centro*). La rana pare a sus crías en el agua, mientras inserta los dedos de sus patas posteriores en el marsupio con el fin de ayudar a liberar a los renacuajos (*dibujo de la derecha*).

pecies de *Gastrotheca*, y ranitas en otros casos) precisan de la ayuda materna. La hembra de *G. riobambae*, por ejemplo, deposita los renacuajos recién nacidos en charcas o pozas agarrándose a una piedra con sus patas anteriores mientras gira las posteriores hasta alcanzar la abertura del marsupio. Extrae los renacuajos de uno en uno con los dedos de las patas traseras tardando dos o más días en parir una puesta completa.

En las especies que dan a luz ranitas formadas, el proceso no ocurre necesariamente cerca del agua. Mientras se hallan en la bolsa, los embriones desarrollan versiones rudimentarias de muchos rasgos característicos de los renacuajos. Al llegar el momento del nacimiento, su metamorfosis es completa: han sobrepasado el estadio acuático. Es posible que muchas de estas ranas arborícolas completen su ciclo biológico sin descender siquiera de la bóveda arbórea de la selva.

El ambiente protegido del marsupio permite que el desarrollo embrionario se realice de manera mucho más lenta en las ranas marsupiales que en las especies cuyos huevos se hallan expuestos y son vulnerables. La incubación en *G. riobambae*, por ejemplo, dura entre 100 y 120 días, en contraste con el día y medio que tardan en eclosionar los huevos acuáticos en *Xenopus laevis* (la rana de uñas africana), especie que constituye un buen punto de comparación porque ha sido estudiada a fondo. ¿Cómo se sustenta el desarrollo durante esta prolongada incubación? Un embrión de rana que eclosiona a los pocos días y da origen a un renacuajo de vida libre no necesita mecanismos especiales para intercambiar gases, líquidos y otras sustancias con el ambiente. Pero en una rana marsupial cabe esperar que madre y embrión se hallen equipados para tales intercambios.

Entre una y otra estación reproductora, cuando el marsupio se encuentra vacío, su interior se parece a la piel ordinaria de la rana. Sin embargo, durante la incubación las paredes desarrollan un delgado revestimiento que está muy irrigado con vasos sanguíneos. Este tapiz del marsupio (que se desprende una vez que los huevos han eclosionado) se ajusta a la forma de los huevos, creando una cámara individual para cada uno de ellos. En el interior de cada cámara embrionaria, el embrión se halla rodeado por una membrana vascular propia; se trata de un conjunto de branquias especializado: las branquias acampanadas.

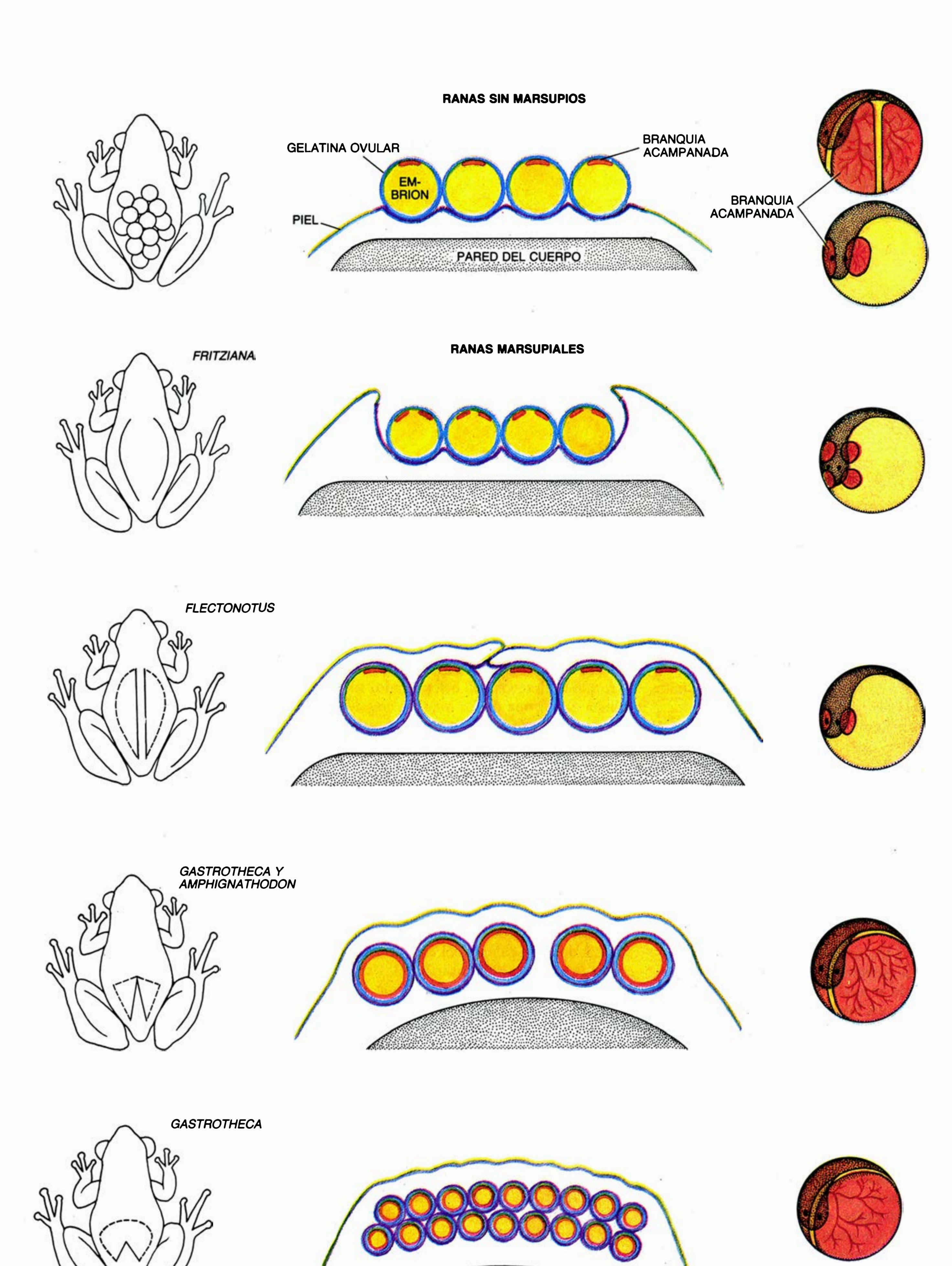
Las branquias acampanadas, desconocidas en otras especies de ranas, se desarrollan después de varias semanas de incubación. Al principio, son películas de tejido que se extienden desde cada lado de la cabeza del embrión; en algunas especies se fusionan y los envuelven completamente, formando un saco repleto de fluido donde el embrión flota. Al nacer, las branquias acampanadas son reabsorbidas o se desprenden.

De esta manera, la madre y los embriones en su bolsa están en íntimo contacto fisiológico. El revestimiento de la cámara embrionaria está separado de las branquias acampanadas del embrión tan sólo por la cápsula ovular de gelatina; en las ranas marsupiales esta capa de gelatina es finísima. Mientras que varios milímetros de gelatina rodean los huevos de otras ranas, la gelatina de los huevos de las ranas marsupiales puede ser 1000 veces más delgada, del orden de algunas micras.

En varios aspectos, semejante disposición nos evoca la gestación de los mamíferos. La cámara llena de líquido en la que se desarrolla el embrión recuerda el saco de líquido amniótico que rodea a los embriones de los mamíferos. Lo que es más importante, el contacto íntimo entre los aportes sanguíneos de la madre y el embrión, a través de las membranas yuxtapuestas, trae a la mente el papel de la placenta mamífera, el órgano que conecta la circulación de la madre y del embrión durante la gestación.

La placenta permite que madre y embrión intercambien gases, líquidos, nutrientes y desechos. Es presumible que un intercambio similar se produzca entre las dos membranas de las ranas marsupiales. Para saber qué obtienen los embriones de la madre, con Bertha Escobar pesé los embriones tomados de ejemplares de *G. riobambae* en varios estadios de incubación. El peso fresco de los embriones se triplicó en el transcurso de la incubación, pero su peso seco se mantuvo relativamente constante. Parecía que había incrementado su contenido en agua y quizá habían intercambiado gases con la madre, aunque los nutrientes que sustentan el desarrollo debían de proceder, en su mayoría, de las propias reservas de vitelo del embrión.

¿Qué activadores hormonales preparan la bolsa para la incubación? Al aprestarnos a contestar esta pregunta, mis colegas Carmen de Albuja, Margarita Campos y yo misma nos encontramos con más paralelismos entre la incubación en las ranas marsupiales y la gestación en los mamíferos. En éstos intervienen varias hormonas en la preparación del útero para la gestación. Las gonadotropinas son


RANAS SIN MARSUPIOS
GELATINA OVULAR
BRANQUIA ACAMPANADA
EM-BRION
PIEL
PARED DEL CUERPO
BRANQUIA ACAMPANADA
FRITZIANA
RANAS MARSUPIALES
FLECTONOTUS
GASTROTHECA Y AMPHIGNATHODON
GASTROTHECA

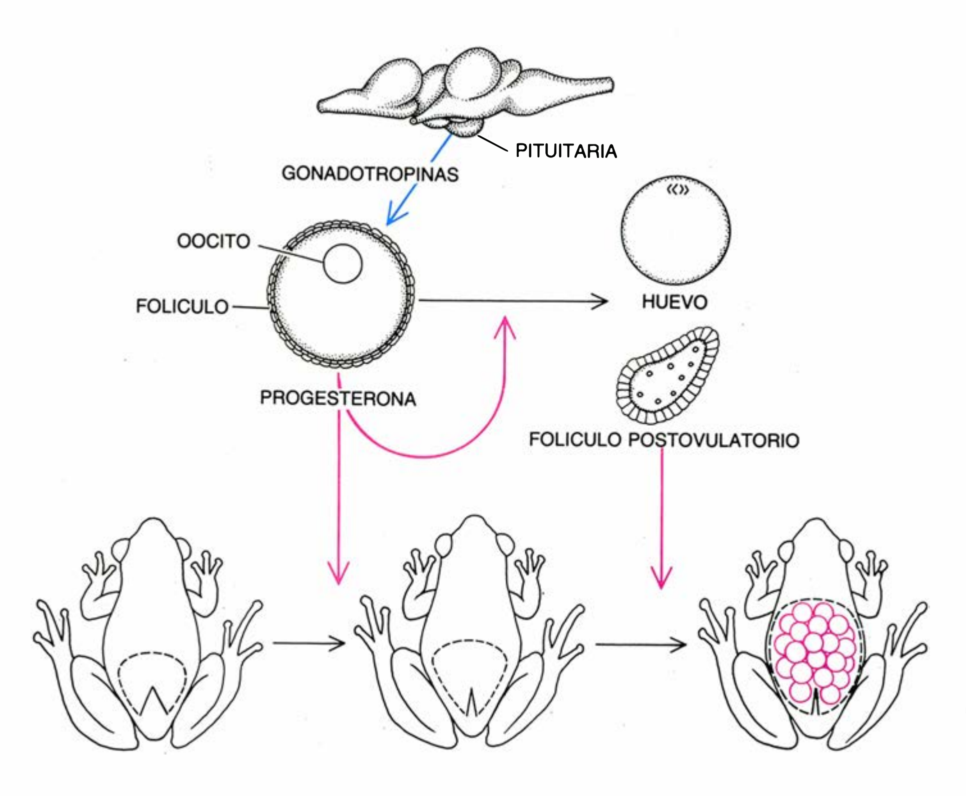
hormonas liberadas por la glándula pituitaria y estimulan al folículo ovárico, una cápsula de células que rodea al oocito en crecimiento (la célula que da origen al huevo). En respuesta, el folículo libera sus propias hormonas: estrógenos y progesterona, que hacen que el revestimiento del útero se engrose y se prepare a recibir al huevo fecundado.

En la mayoría de ranas existe un mecanismo hormonal similar, en dos fases, si bien tienen por misión principal la de activar el crecimiento y la maduración de los oocitos. Las gonadotropinas estimulan la liberación de estrógenos y progesterona por los folículos del ovario; la progesterona induce la serie de cambios celulares que transforman un oocito en un huevo. Descubrimos que en las ranas incubadoras este mecanismo hormonal se encargaba, además, de preparar la bolsa para la incubación.

Un requisito preliminar puede observarse en *G. riobambae* y otras especies marsupiales al acercarse la estación reproductora. Durante la mayor parte del año, la abertura del marsupio permanece dilatada; a medida que la hembra se prepara para la reproducción, la abertura se contrae. La bolsa se mantiene cerrada durante la incubación, lo que le permite guardar los embriones hasta que nacen los renacuajos o las ranas.

Pudimos analizar el control hormonal del cierre mediante la inyección por separado de hormonas y observando sus efectos. Si a una rana se le inyecta gonadotropina, la bolsa se cerrará en el caso exclusivo de que los ovarios posean folículos grandes. En cambio, una única inyección de progesterona determinará el cierre de la bolsa antes de 24 horas, con independencia del tamaño del folículo. Por lo que se ve, la progesterona procedente de los folículos es la responsable directa de la activación del cierre del marsupio; las gonadotropinas estimulan simplemente la liberación de progesterona.

4. MADRE Y EMBRIONES de las ranas incubadoras se hallan en contacto íntimo. De cada género, mostramos la forma del marsupio o de la zona del dorso a la que se adhieren los huevos (*izquierda*); las secciones verticales (*centro*) revelan las relaciones entre la madre y los embriones. Una membrana muy vascularizada (*color púrpura*) envuelve cada huevo, separada tan sólo por una fina lámina de gelatina ovular (*color azul*) de las membranas vasculares propias del embrión, llamadas branquias acampanadas (*color rojo*). La forma de las branquias es variable; en algunos géneros recubren al embrión por entero (*derecha*). En las ranas marsupiales, la estrecha comunicación que existe entre los tejidos de la madre y las branquias acampanadas del embrión les permiten intercambiar gases y líquidos, del mismo modo en que la madre y el embrión se comunican a través de la placenta en el grupo de los mamíferos.



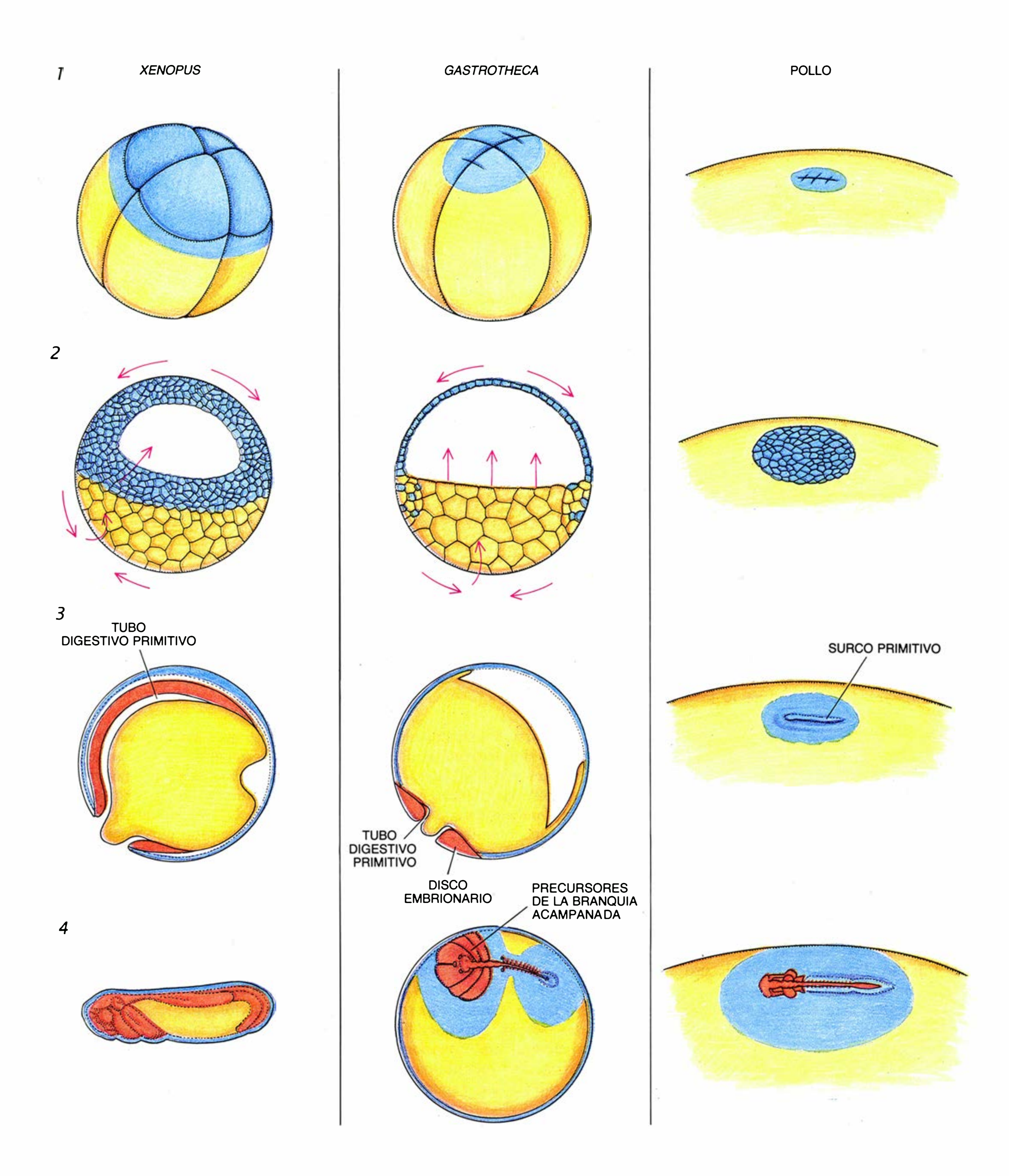
5. DISTINTAS HORMONAS regulan la reproducción en las ranas marsupiales, según la autora y sus colegas. Las gonadotropinas liberadas por la glándula pituitaria, en la base del cerebro, actuarían, suponen, en el ovario al estimular el folículo, es decir, las células que rodean al oocito (la célula precursora del huevo). En respuesta, el folículo liberaría progesterona, que estimularía la maduración del oocito y provocaría el encogimiento de la abertura del marsupio. Liberado el huevo del ovario, el folículo postovulatorio vacío continuaría produciendo progesterona, que instaría el desarrollo de las cámaras vasculares que rodean los embriones en el marsupio. Un mecanismo hormonal similar prepara el útero para la gestación en mamíferos.

El desarrollo de las cámaras embrionarias, que envuelven a cada embrión en una membrana vascular, parece depender también de la progesterona. Si se colocan esferas de plástico del mismo diámetro que los embriones en el marsupio de una hembra cuando ésta no se halla incubando, las esferas acabarán expulsadas a las pocas horas. Pero si suministramos progesterona a la rana, al mismo tiempo que se le colocan las esferas en la bolsa, ésta se cierra sobre las esferas, que quedan encajadas en cámaras embrionarias vascularizadas. La rana retiene los falsos embriones hasta por una semana.

En la época de la incubación, los folículos se han roto ya y han liberado sus huevos. ¿Cuál es, pues, el origen de la progesterona que fomenta el crecimiento de las cámaras embrionarias? En los estadios tempranos de la gestación de los mamíferos, el folículo vacío continúa produciendo progesterona incluso después de la liberación del huevo, con lo que estimula el desarrollo de la pared uterina. En la mayoría de ranas, los folículos postovulatorios permanecen en los ovarios menos de una semana y no se cree que tengan ninguna función hormonal. Pero en *G. riobambae* los folículos vacíos permanecen en los ovarios más de un mes, durante todo el primer tercio de la incubación.

Para averiguar si la progesterona procedía de esos folículos postovulatorios, Grace Sánchez y yo extrajimos los ovarios (y con ellos los posibles folículos postovulatorios) de ranas que se hallaban incubando. La extracción de los ovarios durante las primeras semanas de incubación provocaba el aborto: los embriones parcialmente desarrollados eran expulsados de la bolsa en los 15 a 30 días siguientes. La extracción de los ovarios en un estadio posterior de la incubación no ejercía efecto alguno. Así, pues, al menos en sus estadios tempranos, la incubación de ranas marsupiales depende de una regulación hormonal parecida a la hallada en la gestación de mamíferos.

Quizá los paralelismos prosigan en etapas posteriores de la incubación. El control hormonal de estadios avanzados de la gestación de mamíferos proviene de la propia placenta, que segrega gonadotropinas, progesterona y otras hormonas. Las branquias acam-



6. DESARROLLO EMBRIONARIO TEMPRANO en la rana marsupial *Gastrotheca riobambae*, que tiene características aviares. Los esquemas, que comparan distintas fases del desarrollo de *Gastrotheca* (*centro*) con los mismos estadios en *Xenopus laevis* (*izquierda*), una rana que se reproduce de modo convencional, y en el pollo (*derecha*), no están todos a la misma escala; el embrión de *Xenopus* mide un tercio del tamaño de *Gastrotheca*. En *Xenopus* las primeras divisiones celulares (*1*) producen una esfera celular hueca, la blástula (*2*), que se repliega sobre sí misma en un proceso de "gastrulación"; células grandes, repletas de vitelo (*amarillo*), de un extremo del embrión invaden el interior, y células pobres en vitelo (*azul*) del otro extremo migran para recubrir la superficie del embrión. De este modo se forma una nueva cavidad, el tubo digestivo primitivo (*3*). Todo el embrión está involucrado en la formación del cuerpo (*4*). En el huevo grande y lleno de vitelo del pollo sólo un pequeño disco celular situado sobre la superficie de la masa de vitelo sufre la gastrulación y origina el cuerpo. En *Gastrotheca* el desarrollo temprano se aparta del modelo usual de las ranas. El embrión entero interviene en la gastrulación, como en *Xenopus*. Sin embargo, debido probablemente al gran tamaño del embrión y al elevado contenido en vitelo, las células que toman parte en el desarrollo tardío se concentran en un lado, en un disco que rodea un pequeño intestino primitivo. Lo mismo que ocurre en el pollo, el cuerpo se forma sobre la superficie de una masa de vitelo.

panadas y las cámaras de la bolsa en las ranas marsupiales podrían desempeñar un papel análogo, al liberar hormonas que regularan, por su parte, la incubación avanzada.

Me he limitado a esbozar las adaptaciones que hacen posible que la madre rana incube internamente sus huevos. ¿Cómo repercute esta prolongada incubación, en el cuerpo de la madre, sobre los embriones de las ranas marsupiales?

La incubación interna y el desarrollo embrionario pausado que ésta permite ejerce un efecto obvio en las especies incubadoras: los huevos, de un tamaño excepcional, están bien provistos de vitelo, de manera más parecida a los huevos de aves y reptiles que a los de otras ranas. Los huevos de una especie incubadora, *Gastrotheca cornuta*, miden un centímetro de diámetro, y son frecuentes diámetros de medio centímetro; ejemplos que contrastan con el tamaño del huevo de *Xenopus*, de sólo un milímetro. Las reservas de vitelo, grasas y carbohidratos, que han incrementado el volumen del huevo, mantienen al embrión durante su larga estancia en el marsupio.

Una segunda diferencia entre los huevos de otras ranas y los que se desarrollan en el marsupio de la madre se halla encerrada en la maquinaria molecular del oocito, la célula precursora. El rápido desarrollo que caracteriza a la mayoría de embriones de rana exige una síntesis acelerada de proteínas, materia prima para la construcción de los tejidos corporales. Cierta característica molecular de la mayoría de oocitos de ranas facilita la síntesis de proteínas; me refiero a la presencia de grandes cantidades de ARN ribosómico, o ARNr, así como de otros tipos de moléculas de ARN.

El ARN ribosómico es un elemento estructural clave en los ribosomas, los orgánulos celulares donde se lleva a cabo la síntesis proteica. La gran cantidad de ARNr en los oocitos de la mayoría de ranas (unas 200.000 veces la cantidad que hay en una célula normal del cuerpo de la rana) implica que las células del embrión no necesitarán sintetizarlo ellas mismas antes de fabricar las proteínas, y que el embrión vulnerable puede desarrollarse y eclosionar rápidamente. En cambio, los mamíferos, cuyo embrión se halla protegido en el cuerpo de su madre y pueden desarrollarse lentamente, almacenan poco ARNr en sus oocitos.

Los niveles elevados de ARN ribosómico denuncian la actividad del núcleo del oocito de la rana. Lo mismo que los restantes ARN celulares, el ribosómico se copia del ADN de los genes en el núcleo. Los oocitos de las ranas acumulan niveles altos de ARNr porque sus genes ribosómicos se han multiplicado o duplicado muchas veces. (Se han "amplificado", si usamos el anglicismo.) El oocito de *Xenopus*, por ejemplo, contiene cerca de dos millones de copias del ADN ribosómico, o ADNr. Estos genes no residen en los cromosomas con el resto de los genes de la célula, sino que se hallan segregados dentro del núcleo en los nucléolos; hay más de 1000 nucléolos en el núcleo de un oocito completamente desarrollado de *Xenopus*.

Una medida del rápido desarrollo que la enorme cantidad de ARNr acumulado en el oocito permite es la relativa a la temporización de la gastrulación. La gastrulación constituye el estadio del desarrollo embrionario en el que el embrión temprano, una simple esfera de células, se pliega sobre sí mismo para formar una nueva esfera de dos capas que rodea una cavidad que es la precursora del tubo digestivo. En *Xenopus* la gastrulación tiene lugar a las catorce horas escasas de la fecundación.

En *G. riobambae*, nuestra rana incubadora de referencia, la demora es de 14 días. Me pregunté si ese desarrollo más lento reflejaba un nivel inferior de multiplicación de los genes ribosómicos y un menor contenido de ARNr. El aspecto de los oocitos de *Gastrotheca* sugería que así era. Con Michael F. Trendelenburg, del Centro Alemán de Investigaciones del Cáncer, de Heidelberg, contamos menos de 300 nucléolos en los oocitos de *G. riobambae*, es decir, una cuarta parte del número que hay en los oocitos de *Xenopus*. Cabía esperar que este número menor indicara un nivel inferior de multiplicación de genes ribosómicos y, por ello, una menor dotación de ARNr.

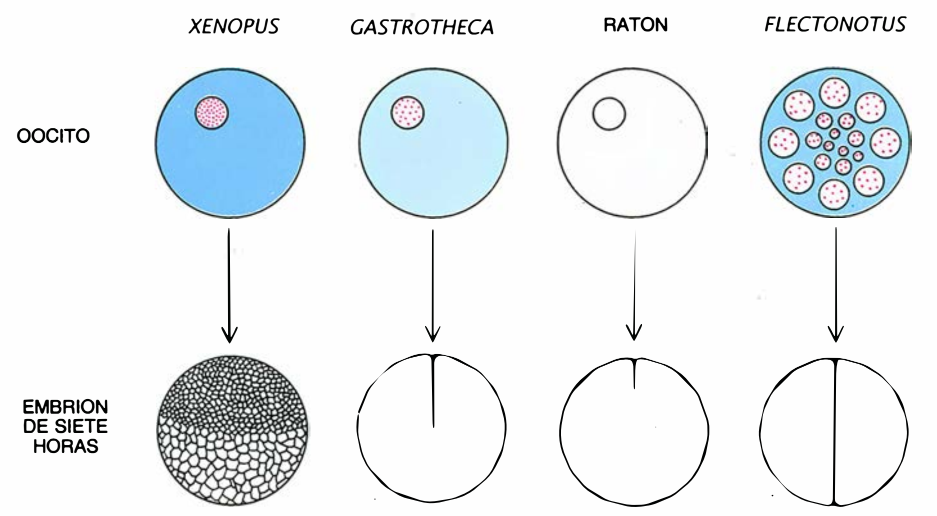
Para medir el nivel de multiplicación génica en los oocitos de *Gastrotheca* recurrimos a los métodos moleculares. Christine Dreyer, del Instituto Max Planck de Biología del Desarrollo de Tubinga, y yo sometimos los oocitos a una sonda de ADN ribosómico clonado de *Xenopus*. (Una hebra solitaria de ADN de un organismo puede unirse a las secuencias correspondientes en el ADN o ARN de otros organismos, e identificarlas.) La sonda detectó poco ADNr.

Para averiguar si el bajo nivel de multiplicación génica propiciaba una menor dotación de ARNr, Peter Hausen, de Tubinga, y yo aplicamos una tinción específica de ARN a secciones de oocitos. La tinción fue débil en *Gastrotheca* e intensa en *Xenopus*. Aislando ARN de los oocitos y aplicando después una sonda de ADNr, Herbert Steinbeisser y Ansgar Hofmann, del Centro Alemán de Investigaciones del Cáncer, y yo medimos directamente el contenido en ARNr. Comprobamos que los oocitos de *Gastrotheca* encerraban mucho menos ARNr que los de *Xenopus*.

Incluso en el ámbito molecular, algunas características del desarrollo de las ranas marsupiales no son típicas de las ranas, sino parecidas a las de los mamíferos. En mis primeros estudios había descubierto, sin embargo, ciertas características de los oocitos de algunas ranas marsupiales que eran prácticamente desconocidas no solamente en otras ranas, sino en otros vertebrados. En 1976, el difunto Scott J. Maness, de la Estación Biológica de Rancho Grande, en Venezuela, me presentó la fascinante rana marsupial *Flectonotus pygmaeus*. De no más de tres centímetros de longitud, este habitante de la bóveda arbórea de la pluviselva incuba entre cinco y once huevos en su marsupio y da a luz renacuajos, que deposita en las charcas de agua de lluvia que se acumula en las plantas arbóreas.

La impresionante peculiaridad de *Flectonotus* se demostró cuando abrí uno de sus oocitos bajo el microscopio. En vez de un núcleo único, se derramaron miles de estructuras esféricas. Al examinar las estructuras y estudiar su actividad bioquímica, mi antiguo profesor Asa A. Humphries, Jr., entonces en la Universidad de Emory, y yo las identificamos positivamente como núcleos activos del oocito. ¡Contamos una media de 2000 núcleos por oocito! Por aquella época se sabía sólo de otro vertebrado, el sapo con cola de Norteamérica (*Ascaphus truei*), que tuviera más de un núcleo por oocito, y únicamente poseía ocho. ¿Cuál podría ser la finalidad de portar tantos núcleos?

Una clave reside en el rápido desarrollo de los embriones de *Flectonotus*. Los embriones se incuban sólo durante 20 días, y los renacuajos se transforman en ranas 11 días después. Este desarrollo acelerado requiere probablemente una gran dotación de ARNr. Entra dentro de lo razonable pensar que *Flec-*



7. NIVEL DE ARN RIBOSOMICO (*azul*) **en el oocito; está correlacionado con la velocidad de desarrollo embrionario. En** ***Xenopus*****, una rana con huevos acuáticos, el ARNr es abundante porque los genes ribosómicos se han multiplicado (*****rojo*****), y el embrión vulnerable se desarrolla rápidamente. Siete horas después de la fertilización se ha dividido ya en unas 4000 células. En la rana marsupial** ***Gastrotheca*****, como en los mamíferos tales como el ratón, el desarrollo puede ser pausado porque el embrión está protegido. El nivel de ARNr es bajo, lo que refleja una amplificación reducida o nula de los genes ribosómicos; pasadas siete horas el embrión todavía tiene sólo una o dos células. En algunas ranas incubadoras, como** ***Flectonotus*****, el oocito posee muchos núcleos, lo que implica un contenido mayor en ARNr y un aceleramiento del desarrollo.**

tonotus descienda de una típica especie incubadora, en la que el desarrollo embrionario era más lento y se había reducido la multiplicación de los genes ribosómicos. Las menores proporciones corporales y la corta vida de *Flectonotus* fomentarían un desarrollo más rápido. La incorporación de miles de núcleos en cada oocito, cada núcleo con una multiplicación limitada de los genes ribosómicos, podría ser la respuesta evolutiva frente a la necesidad de más ARNr. La estrategia resultaría eficaz, como Herbert C. Macgregor, de la Universidad de Leicester, y yo comprobamos al medir el nivel global de multiplicación de los genes ribosómicos.

Por insólitos que sean en otros organismos, los oocitos multinucleados son bastante abundantes entre las ranas arborícolas incubadoras: de las 36 especies que examinamos, los encontramos en 14. En cada caso, la adaptación surgió, cabe presumirlo, en respuesta a una presión ambiental que favorecía un desarrollo embrionario más rápido. Pero esa característica plantea muchas preguntas. A medida que un oocito multinucleado crece en el ovario, el número de núcleos se reduce vertiginosamente hasta que sólo queda uno, que se unirá con el núcleo del espermatozoide durante la fecundación. ¿Cómo se controla esta purga de núcleos? ¿De qué modo se selecciona un núcleo entre miles?

Se desarrolle a partir de un oocito con un núcleo o a partir de otro dotado de muchos, el huevo de una rana marsupial es peculiar, lo mismo desde el punto de vista estructural que desde el molecular. Podría esperarse que estas diferencias afectasen al modelo de desarrollo embrionario: la coreografía del crecimiento y del movimiento celular que empieza con la fecundación del huevo y su transferencia al marsupio. Con Richard P. Elinson, de la Universidad de Toronto, abordé el desarrollo embrionario temprano en *Gastrotheca*. También aquí encontramos desviaciones del modelo usual en las ranas y semejanzas con el modelo propio de otros animales, en concreto aves y reptiles.

Aparecen anomalías sorprendentes en la gastrulación, cuando el embrión primitivo se repliega hacia dentro y células de un lado de la esfera migran recubriendo la cavidad resultante, que es el tubo digestivo primitivo. En la mayoría de embriones de rana, el tubo digestivo primitivo se extiende por buena parte de la gástrula. El plan original de cuerpo y el desarrollo embrionario tardío comprometen, pues, todo el embrión. En aves y reptiles, sin embargo, la gran cantidad de vitelo que llena el embrión temprano restringe la gastrulación. Sólo un pequeño disco de células concentrado en un lado del huevo toma parte en los movimientos que establecen el tubo digestivo primitivo, y sólo estas células formarán el cuerpo. El resto del embrión consta de una masa de vitelo, indivisa, que es utilizada por el embrión en desarrollo.

Elinson y yo encontramos que en las ranas incubadoras, como en las demás, el embrión entero participaba en la gastrulación: empezando en un extremo, pequeñas células que contenían poco vitelo se abrían camino para crear una nueva capa celular que cubría todo el huevo. Ahora bien, el replegamiento que suele producirse durante la gastrulación es limitado y el tubo digestivo primitivo que se forma así queda confinado a una pequeña cavidad en un extremo del embrión. Sólo el disco de células que rodea este pequeño tubo digestivo primitivo se ve implicado directamente en el desarrollo embrionario tardío. El embrión en desarrollo se extiende sobre una cara de una gran masa de vitelo, como los embriones tempranos de aves y reptiles.

Cientos de millones de años de evolución separan a las ranas marsupiales de los animales terrestres con los que las he comparado: mamíferos, aves y reptiles. Pero estas ranas han adoptado muchas respuestas similares frente al desafío adaptativo que supone la reproducción terrestre. Puede resultar divertido especular acerca del potencial reproductor evolutivo de las ranas arborícolas que incuban sus huevos. Con el tiempo, ¿podrían originar una clase completamente nueva de vertebrados terrestres? Después de todo, no sería la primera vez que los anfibios conquistaran la tierra: los mamíferos, aves y reptiles tienen antepasados que fueron anfibios.

Pero es mucho más probable que, al menos para muchas especies de ranas marsupiales, la aventura evolutiva esté terminando. Su hábitat, la selva tropical, está desapareciendo, llevándose con él muchos seres insólitos que viven en la bóveda arbórea. Puede que las especies menos conocidas de ranas arborícolas incubadoras sean eliminadas antes de mostrarnos los secretos que encierran.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

MULTIPLE NUCLEI DURING EARLY OOGENESIS IN *FLECTONOTUS PYGMAEUS* AND MARSUPIAL FROGS. Eugenia M. del Pino y A. A. Humphries, Jr., en *The Biological Bulletin*, vol. 154, n.º 2, págs. 198-212; abril de 1978.

A NOVEL DEVELOPMENT PATTERN FOR FROGS: GASTRULATION PRODUCES AN EMBRYONIC DISK. Eugenia M. del Pino y Richard P. Elinson en *Nature*, vol. 306, n.º 5943, págs. 589-591; 8 de diciembre de 1983.

OOGENESIS IN THE EGG-BROODING FROG *GASTROTHECA RIOBAMBAE* PRODUCES LARGE OOCYTES WITH FEWER NUCLEOLI AND LOW RNA CONTENT IN COMPARISON TO *XENOPUS LAEVIS*. E. M. del Pino, H. Steinbeisser, A. Hofmann, C. Dreyer, M. Campos y M. F. Trendelenburg en *Differentiation*, vol. 32, págs. 24-33; 1986.

Fibras ópticas en medicina

El avance en la técnica de la fibra óptica ha permitido el desarrollo de instrumentos que nos muestran la anatomía interna, de sensores que analizan la sangre y de sistemas de láser que operan con maestría

Abraham Katzir

Las fibras ópticas, que están transformando el mundo de las comunicaciones, están revolucionando también, en el dominio de la medicina, la técnica de la formación de imágenes, el diagnóstico y la terapia. Esas fibras ultrafinas y flexibles han abierto la ventana que da a los tejidos vivos del cuerpo humano. Introduciéndolas a través de las aberturas naturales del cuerpo o a través de pequeñas incisiones, y dirigiéndolas por los conductos internos del organismo, los médicos pueden asomarse a las vías aéreas de los pulmones, a los pliegues intestinales, a las cavidades del corazón y a muchos otros espacios que antaño resultaban inaccesibles. La colocación de sensores de fibra óptica en el torrente circulatorio facilita la obtención de análisis rápidos y fiables en la habitación del enfermo o en la mesa de operaciones, análisis que venían exigiendo la toma de muestras de sangre en determinados departamentos sanitarios y su valoración en el laboratorio. Los cirujanos, por su parte, dirigiendo un haz luminoso de láser a través de una fibra óptica, pueden evitar el recurso a técnicas agresivas que lesionan el tejido sano para acceder a la zona enferma.

Demos algún ejemplo. Gracias a la emisión de rayos láser a través de fibras ópticas, los gastroenterólogos han cauterizado vasos sanguíneos para detener hemorragias intestinales, los cirujanos vasculares comienzan a destruir placas y coágulos de las arterias periféricas y se espera que los neurocirujanos logren coser nervios del cerebro y de la médula espinal. En poco tiempo, los instrumentos de fibra óptica permitirán combinar el diagnóstico con el tratamiento; piénsese, en este sentido, en la conjunción de métodos para detectar las células cancerosas y métodos para destruirlas sin dañar el tejido sano adyacente.

Muchas de las prácticas que emplean fibra óptica para el diagnóstico y el tratamiento no precisan anestesia y se pueden realizar con absoluta seguridad en la consulta del médico. El desarrollo de estas técnicas reducirá, pues, el riesgo y el coste de la asistencia sanitaria. Tales procedimientos podrían aplicarse también en aquellos casos en los que la cirugía invasiva resulta peligrosa o imposible, como sucede a veces en los jóvenes o en los ancianos.

Las primeras aplicaciones médicas de las fibras ópticas se dieron en los sistemas de diagnóstico por imagen llamados fibroscopios. En 1957, Basil I. Hirschowitz y Lawrence Curtis, de la Facultad de Medicina de Michigan, construyeron el primer fibroscopio para observar el estómago y el esófago. De entonces acá, la técnica se ha refinado hasta el punto de que se inspeccionan ya la inmensa mayoría de órganos y sistemas corporales. La verdad es que el grueso de las fibras ópticas empleadas en el campo de la medicina forman parte de los fibroscopios. En su versión moderna, el fibroscopio consta de dos haces de fibras ópticas: el transmisor de luz y el haz de imagen. El haz transmisor de luz ilumina los tejidos, mientras que el otro, el haz de imagen, transmite la imagen al observador.

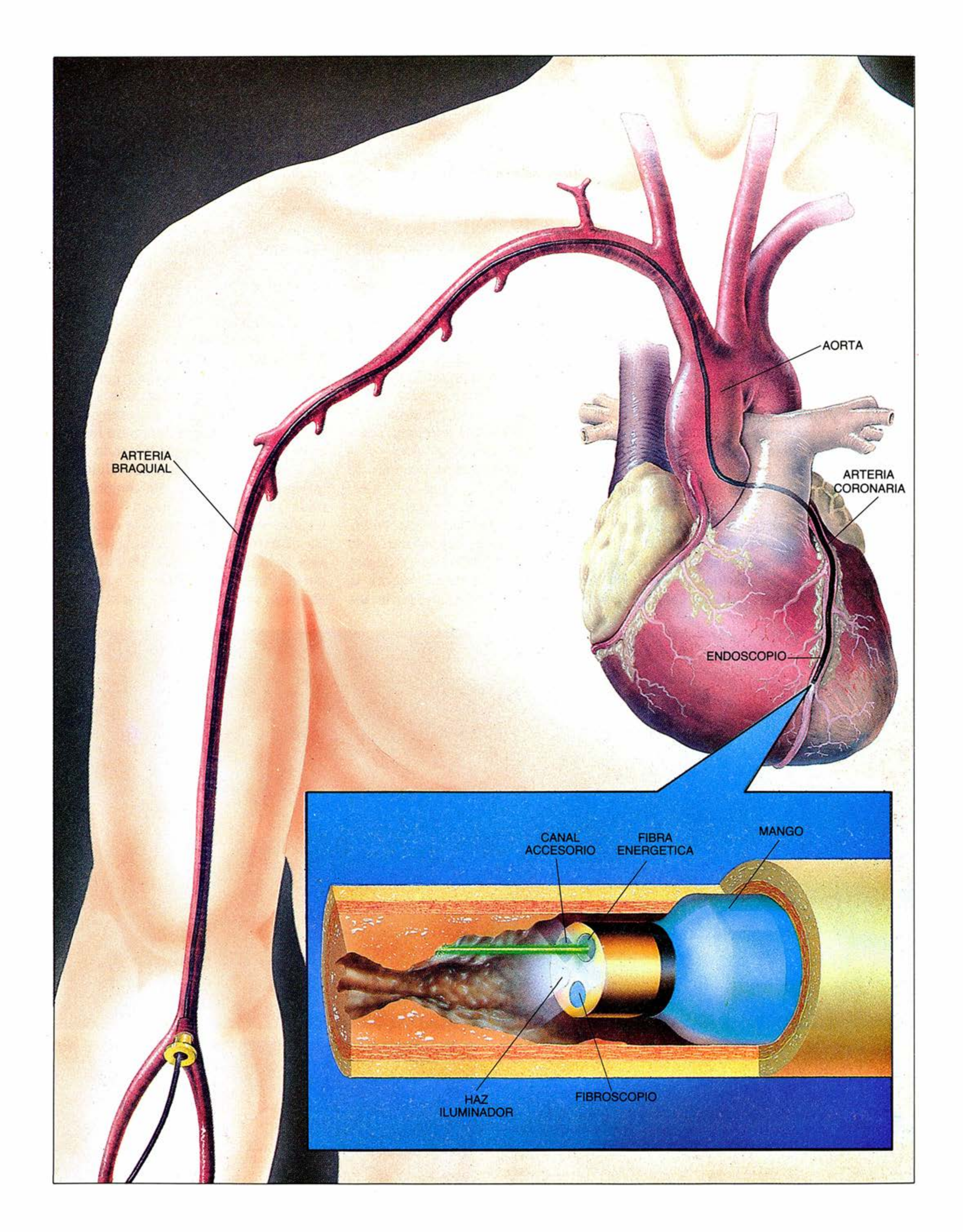
El haz transmisor de luz se conecta a una lámpara de arco de xenón u otra fuente de luz de alta intensidad. La luz viaja por el interior de las fibras, fabricadas en cristal de sílice muy puro. Comparado con el de una ventana, este cristal atenúa la luz 10.000 veces menos y, así, puede transportarla a muchos kilómetros de distancia. La luz tiende a desviarse del interior de la fibra hacia la periferia; por ello, se reviste dicho núcleo con un material que refleja la mayor parte de la luz, desviada de nuevo hacia el interior. Tal es el mecanismo de transmisión de la luz en todas las fibras ópticas.

Una lente recoge la luz reflejada por el tejido y la dirige hacia el extremo receptor del haz de imagen. Cada fibra óptica de este haz admite exclusivamente la luz reflejada que se alinea con su propio eje; así, cada fibra transmite sólo una pequeña parte de la imagen total. Las fibras están adheridas entre sí en sus extremos, sin que se resienta la flexibilidad y sí se evite la deformación de la imagen. La imagen reconstruida puede verse a través de un visor, filmarse con una cámara o reproducirse en una pantalla de televisión. Dada la posibilidad de combinar miles de fibras en un mismo haz cuyo diámetro ni siquiera mida un milímetro, el fibroscopio está capacitado para transmitir imágenes con una alta resolución espacial y una cromaticidad casi perfecta.

El haz transmisor de luz y el de imagen se pueden ajustar fácilmente en un catéter de unos milímetros de diámetro. Este fibroscopio puede, a su vez, introducirse a través de orificios del cuerpo y dirigirse hacia tejidos que distan de cinco a 100 milímetros del extremo superior.

A menudo, los fibroscopios forman parte integrante de instrumentos más complejos, los endoscopios; poseen éstos unos canales auxiliares que permiten desarrollar otras funciones. A través de un canal de ésos, podemos drenar fluidos o inyectar agua o aire para limpiar residuos y mejorar así la visibilidad. Otro canal puede contener alambres finos cuya manipulación nos deje dirigir el extremo terminal del endoscopio. Un tercero puede incluir escalpelos muy finos para cortar los tejidos, pinzas para separarlos o agujas

ABRAHAM KATZIR, dirige el grupo de física aplicada de la Universidad israelí de Tel Aviv, de la que es también docente. Cursó sus estudios en la Universidad de Jerusalén. Ha pasado varios años en el Instituto de Tecnología de California y en los Laboratorios AT&T Bell, amén de dar clases en la Universidad de Boston y en el Instituto de Tecnología de Massachusetts. Con su grupo de Tel Aviv está desarrollando fibras ópticas infrarrojas y sistemas para aplicaciones médicas e industriales.



1. ESTAN CAPACITADAS LAS FIBRAS OPTICAS para transmitir haces de luz láser hasta el interior de las arterias coronarias y vaporizar allí una placa. En un futuro inmediato se podría desarrollar un instrumento que constara de un fibroscopio, un mango hinchable y una fibra de energía. El médico introduciría el dispositivo a través de la arteria braquial y lo dirigiría hacia la arteria coronaria. El fibroscopio le permitiría ver la placa u otros elementos obstructores. El mango se hincharía para detener temporalmente el flujo sanguíneo; un haz de luz láser, emitida a través de la fibra vaporizaría la placa.

para inyectar fármacos. La mayoría de endoscopios del mercado tienen una longitud entre 0,3 y 1,2 metros, con un diámetro de 2,5 a 15 milímetros.

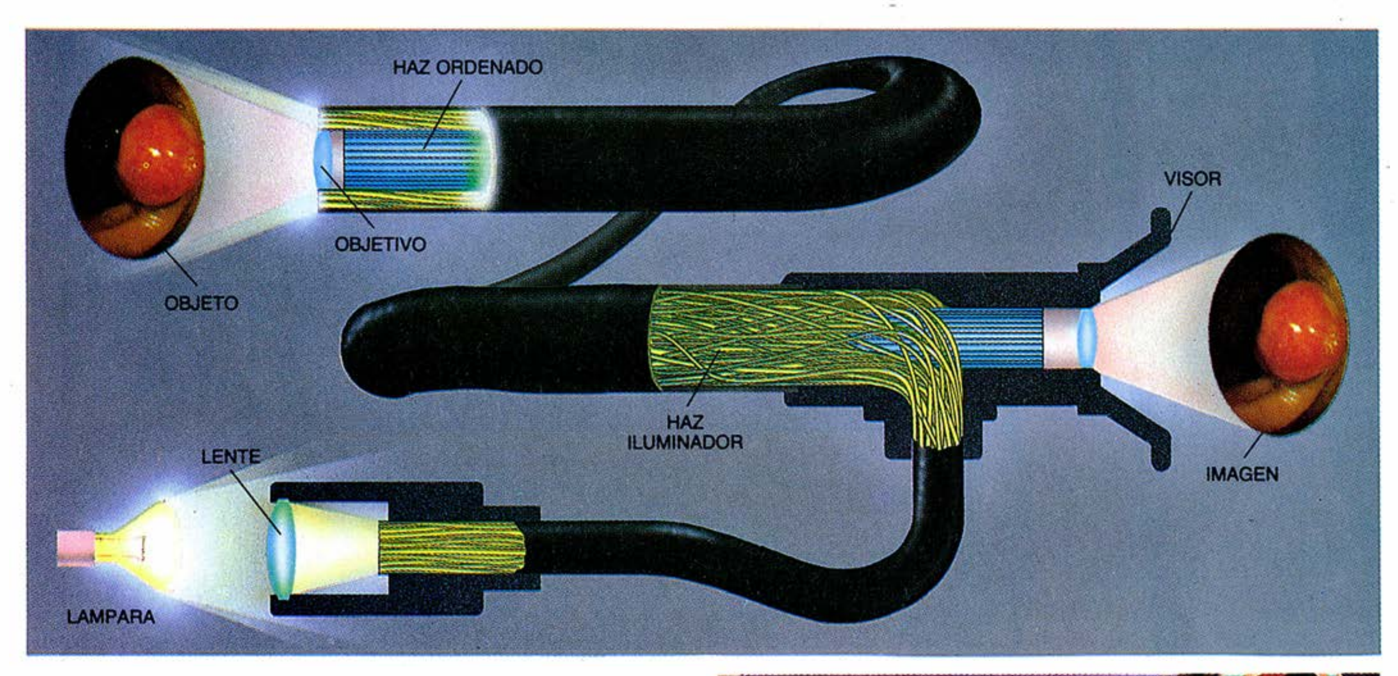
Con estos instrumentos, los médicos pueden observar de cerca los sistemas digestivo, reproductor, circulatorio y respiratorio. Pueden tomar pequeñas muestras de tejido para su análisis en el laboratorio e incluso operar. Asomándose al fibroscopio, el médico puede detectar un pólipo en el colon, un objeto extraño en los pulmones o un tumor en el esófago y extirparlo con la ayuda de instrumentos de cirugía minúsculos.

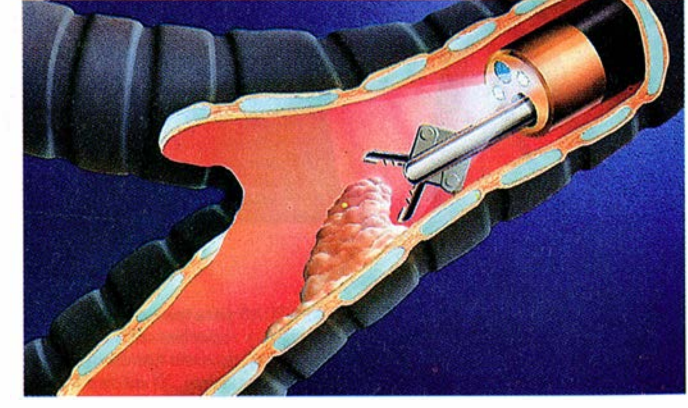
Durante los últimos cinco años, la fabricación de fibras ultrafinas ha permitido reducir el diámetro de los fibroscopios y aumentar el número de fibras en el haz de imagen, lo que ha traído consigo una mejor resolución. Los nuevos fibroscopios contienen 10.000 fibras en un haz de menos de un milímetro de diámetro y nos dejan observar objetos de 70 micras de ancho. Estos fibroscopios, introducidos a través de una arteria del brazo, pueden transmitir imágenes de las válvulas cardíacas, así como de obstrucciones en las arterias coronarias, los vasos que irrigan el corazón.

Además de proporcionar imágenes, los sistemas de fibras ópticas facilitan análisis físicos y químicos directos e inmediatos de la sangre y de otros capítulos de la fisiología humana. El sistema sensor básico consiste en una fibra óptica introducida a través de un catéter en el cuerpo. El extremo externo de la fibra se halla unido a una fuente de luz y a un procesador óptico, que analiza la luz reflejada. El otro extremo de la fibra envía luz directamente hacia el interior del cuerpo o a un sensor en miniatura llamado optodo. La luz reflejada retorna, a través de la fibra, al procesador, que obtiene información, a partir de la longitud de onda y la intensidad de la luz reflejada, acerca de las condiciones fisiológicas.

En muchos casos, estos sistemas de fibras resultarán quizá más sensibles, fiables, eficaces y económicos que los métodos tradicionales, en los que se extraen los fluidos del organismo y se analizan en el laboratorio. Los sistemas de fibras son inmediatos y reducen la posibilidad de error. Por otra parte, los sensores de fibra óptica son compatibles con la química del organismo (por ejemplo, no provocan una respuesta del sistema inmune); en principio, la propia fibra óptica es desechable. Los sistemas de fibras ópticas parecen ser también más duraderos, flexibles y potencialmente seguros que los instrumentos microelectrónicos que se han desarrollado para obtener información del interior del organismo. Algunos de los instrumentos de fibras ópticas ya están disponibles en el mercado y muchos otros se encuentran en período de evaluación clínica.

La medición con fibra óptica del flujo sanguíneo se basa en la luz reflejada por las células. Se introduce una fibra, a través de un catéter, en una arteria. Se envía luz láser de baja intensidad a través de la fibra que iluminará los glóbulos rojos de la sangre. Cuando la luz se dispersa al encontrarse células en movimiento, cambia su longitud de onda en virtud del efecto Doppler. Cuanto más deprisa corra la célula hacia el extremo de la fibra, más corta será la longitud de onda de la luz dispersa. Parte de esta luz se transmite, ahora en sentido inverso, a través de la





2. FIBROSCOPIO (*arriba*) que permite obtener imágenes del estómago y de muchos otros órganos. Una lente dirige la luz de una lámpara hacia un haz de fibras ópticas. La luz transmitida a través de las fibras ilumina un pólipo del estómago. Otra lente objetivo dirige la luz que se refleja del pólipo hacia un haz ordenado de fibras. Cada fibra transporta una fracción de la imagen total. Cuando las fibras del haz ordenado transmiten la luz hasta el extremo terminal, se reconstruye la imagen y ésta se puede ver a través de un visor. Las fotografías del pólipo (*dibujo superior*) se obtuvieron con fibroscopios en la Clínica Mayo de Nueva York. Frecuentemente, los fibroscopios están incluidos en instrumentos mayores, los endoscopios (*derecha*); alojan éstos unos canales a través de los cuales pueden hacerse pasar otros dispositivos. En el dibujo, se está iluminando el tejido de un bronquio para hacerlo visible mientras se extirpa dicho tejido por medio de un instrumento quirúrgico introducido a través del endoscopio.

fibra. El procesador, situado en el otro extremo de la fibra, determinará la diferencia de longitud de onda entre la luz láser y la luz dispersada y computará la velocidad de la sangre en el extremo opuesto de la fibra.

Los primeros experimentos que desarrollaban esta técnica datan de hace al menos tres décadas, pero sólo recientemente se ha iniciado su aplicación clínica. Cuando la técnica adquiera la perfección debida, proporcionará mediciones instantáneas de la velocidad de la sangre y permitirá saber si un aporte apropiado de sangre está irrigando los órganos vitales.

Las fibras ópticas también permiten conocer de forma directa el contenido de oxígeno de la sangre. La hemoglobina (compuesto químico encargado del transporte del oxígeno en la sangre) refleja una cantidad mayor de luz roja cuando transporta oxígeno. Sin embargo, la luz infrarroja se refleja en igual cantidad independientemente de la carga de oxígeno de la hemoglobina. Si se transmite luz roja e infrarroja a la sangre a través de fibras ópticas, la intensidad de la luz roja reflejada revela la cantidad de hemoglobina que transporta oxígeno, mientras que la intensidad de la luz infrarroja nos indica la cantidad total de hemoglobina. Gracias a esta técnica, conocemos la capacidad de la sangre de un enfermo para transportar oxígeno y la del corazón y los pulmones para aportarlo.

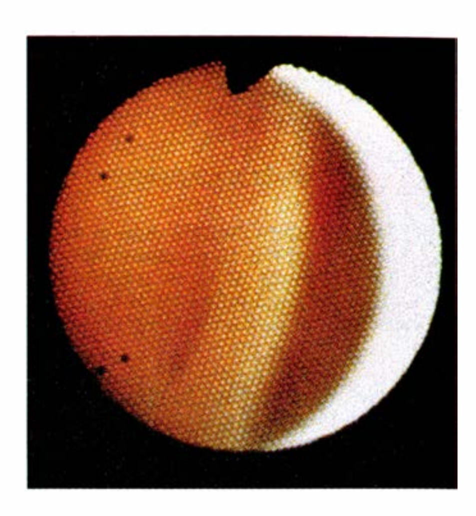
Otros sensores minúsculos y conectados a los extremos de las fibras ópticas han permitido múltiples mediciones fisiológicas más [*véase la figura 4*]. Así, se han desarrollado dispositivos para medir la presión en las arterias, en la vejiga, en la uretra o en el recto. El sensor consta de un pequeño tubo situado en el extremo de una fibra óptica, con el orificio terminal del tubo sellado por una fina membrana reflectora. Si las presiones a un lado y otro de la membrana son iguales, ésta se mantendrá plana, y la luz transmitida a través de la fibra se reflejará de nuevo de forma directa. Si la presión en el exterior del tubo fuera mayor que en su interior, la membrana se abombaría hacia dentro, formando un espejo convexo que reflejaría menos luz hacia la fibra. Si la presión en el exterior del tubo fuera menor que en su interior, la membrana se curvaría hacia fuera y la superficie cóncava dirigiría más luz hacia la fibra. En distintos experimentos clínicos, se ha encontrado una correlación alta entre los resultados obtenidos con un dispositivo de fibras como el descrito y los alcanzados con los instrumentos al uso.

Se han desarrollado sensores que permiten conocer la química sanguínea. Los que miden la acidez o la alcalinidad de la sangre (su *p*H) se basan en colorantes orgánicos que emiten luminiscencia bajo radiación ultravioleta. Un cambio en el *p*H se traduce en una luminiscencia más brillante para algunos colorantes y en luminiscencia de distinto color para otros. Estos colorantes, incluidos en un polímero poroso, se colocan en el final de una fibra. El polímero facilita que los iones de hidrógeno entren, pero impide que iones mayores interaccionen con el colorante y lo degraden. En la práctica, este sensor puede medir el *p*H de la sangre hasta una centésima de unidades de ese parámetro.

Otros sensores, con un diseño similar, incorporan enzimas, anticuerpos u otras moléculas orgánicas. Un cambio en la fluorescencia de estas biomoléculas puede revelar la presencia o ausencia de compuestos químicos específicos en fluidos de constitución compleja, como la sangre o los tejidos orgánicos. Una fibra transmite la información del sensor a un procesador, que la interpreta y así aporta resultados o mediciones altamente específicos de muy distintos elementos químicos del organismo. Estos sensores se han empleado ya para seguir los niveles de glucosa y penicilina y pronto se aplicarán en la medición de sustancias terapéuticas y metabólicas, hormonas, toxinas y microorganismos.

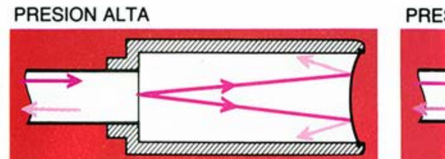
En los últimos años, la aplicación más significativa de las fibras ópticas en la medicina ha sido la emisión de energía láser en el interior del cuerpo con fines terapéuticos y quirúrgicos. El modo de interacción entre la radiación láser y los tejidos corporales depende de la longitud de onda y de la intensidad de dicha radiación. Aunque un láser particular emite luz con una única longitud de onda, o color, hay ya distintos tipos de láseres que generan luz en todo el espectro visible, infrarrojo y ultravioleta. El tejido absorbe la luz en una cuantía que varía según la longitud de onda y los cromóforos del tejido (pigmentos como la hemoglobina, la melanina y la queratina). Por tanto, un láser de una determinada longitud de onda se dirigirá a tejidos específicos y producirá reacciones fotoquímicas igualmente específicas.

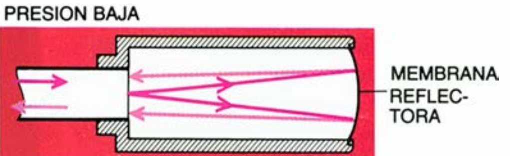
En general, los láseres de baja energía producen calentamientos leves y locales que coagulan la sangre y las proteínas. De esa forma, la luz láser puede unir tejidos blandos y, por tanto, curar heridas o unir vasos sanguíneos. Los láseres de alta energía destruyen los tejidos, en muchas ocasiones mediante la ebullición y consiguiente evaporación del agua. Una emisión de tales características puede también cauterizar las incisiones, de modo que se pierda una cantidad mínima de sangre durante la cirugía. Las aplicaciones quirúrgicas del láser requieren entre 10 y 100 watt de energía láser continua o energía intermitente que alcance máximos entre 10.000 y un millón de watt. Dado que toda esa energía se descarga en áreas de menos de un milímetro cuadrado, la densidad de energía viene a ser casi igual a la que necesitaría un láser de la "guerra de las galaxias" para perforar la cubierta de un misil teledirigido en fase de despegue.



3. VENTRICULO DERECHO de un corazón humano fotografiado a través de un fibroscopio ultrafino introducido en una arteria del brazo. El fibroscopio, cuyo diámetro ni siquiera alcanza el milímetro, fue desarrollado por la empresa Olympus.

¿Cómo liberar esa energía en el interior del cuerpo a través de las fibras ópticas? Ese es el reto con el que han venido pugnando los investigadores de este campo durante las dos últimas décadas. Todas las fibras ópticas atenúan la luz en cierta medida por la dispersión y la absorción. Una parte de esa atenuación depende de las propiedades intrínsecas del material de la fibra: esa atenuación intrínseca varía con la longitud de onda de la luz y con la energía total transmitida. De igual forma, la energía de la emisión láser se puede atenuar como resultado de su dispersión hacia fuera de la superficie de la fibra o por fallos del interior de la misma. Todos esos efectos limitan los niveles de energía que se pueden liberar en el lugar de aplicación. Si la energía de entrada del láser aumenta por encima de un nivel crítico, el extremo de la fibra se calentará en demasía hasta fundirse o vaporizarse. En los últimos años, se han superado muchas dificultades con el descubrimiento de nuevos





4. SENSOR DE FIBRA OPTICA capaz de medir la presión en arterias, vejiga y útero. Posee un tubo al final de una fibra; el extremo terminal del tubo está sellado por una membrana reflectora. Si la presión es mayor fuera del tubo que en su interior (*izquierda*), la membrana se incurva hacia dentro, creando un espejo convexo que refleja menos luz hacia la fibra. Si la presión es menor fuera del tubo que en su interior (*derecha*), la membrana se abomba hacia fuera; la superficie cóncava dirige más cantidad de luz hacia la fibra.

materiales de fibra óptica y con el desarrollo de métodos para fabricar fibras de alta pureza a partir de aquéllos.

A diferencia de las fibras de cristal de sílice utilizadas en los sistemas de imagen y diagnóstico, las fibras diseñadas para la cirugía con láser están constituidas por materiales algo exóticos. Se han desarrollado fibras de cuarzo para transmitir la luz verde de los láseres de argón, la luz ultravioleta de los láseres excímeros y la radiación casi infrarroja de los láseres YAG (así llamados por el neodimio, cristal granate de itrio-aluminio, que es el material del láser). Estas fibras han llegado a transmitir más de 100 watt de energía láser continua, suficiente para la mayoría de aplicaciones quirúrgicas. Sin embargo, los científicos andan buscando todavía una fibra que pueda transmitir eficazmente la radiación de los láseres infrarojos, en particular del láser de dióxido de carbono. Actualmente, las mejores fibras ópticas infrarrojas para este uso son las fibras policristalinas, fabricadas con cristales de haluros metálicos.

En 1973 se diseñó el primer instrumento médico que incorporaba láseres y fibras ópticas para controlar la hemorragia de las úlceras pépticas. Constaba de un fibroscopio, para observar la intervención, y de una fibra independiente, para liberar la energía láser que cauterizaba la úlcera. Desde entonces, estos instrumentos han venido tratando con éxito úlceras hemorrágicas de estómago, intestino y colon. Asimismo, se ha utilizado la fibra transmisora de láser para destruir piedras del riñón. Sin embargo, las perspectivas de utilización terapeútica más interesantes se encuentran en el tratamiento de enfermedades cardiovasculares y tumores localizados.

Muchas de las enfermedades del sistema cardiovascular más devastadoras se presentan cuando depósitos fibrosos de lípidos calcificados, la llamada placa ateroesclerótica, y coágulos de sangre bloquean las arterias. Si esas obstrucciones impiden la circulación de la sangre se producen síncopes, ataques cardíacos y gangrena en los miembros. Hoy en día, para tratar a un enfermo con obstrucciones en las arterias coronarias el médico debe comenzar por aplicar la angioplastia coronaria transluminal percutánea. Esta técnica utiliza un catéter especial, que tiene un pequeño balón en su extremo. Si la arteria está ocluida sólo parcialmente, se puede introducir el extremo del catéter a través de la región estrechada. El balón se hincha de forma que comprime la zona y reduce la oclusión. Este método no sirve para tratar oclusiones completas y sus beneficios pueden ser sólo temporales.

El desarrollo de fibras ópticas capaces de liberar una cantidad suficiente de energía láser permite ya poner en práctica técnicas nuevas para limpiar las obstrucciones arteriales: angioplastias con láser. En algunas de estas técnicas, se cubre el extremo de la fibra con un pequeño cabo de metal. Si se inserta la fibra en una arteria obstruida y se envía luz láser a través de la fibra, el cabo metálico se calentará y ablandará la obstrucción. La técnica ha de ejecutarse con un control muy riguroso, ante el peligro de que el cabo caliente se adhiera a la pared arterial o acabe incluso por perforarla. Se están utilizando con éxito varios instrumentos de angioplastia con láser.

Existe otro método alternativo más eficaz y complejo; se basa en la destrucción directa de la placa por la luz láser. En los primeros sistemas experimentales de este tipo, se empleaba láser de argón, que emite luz verde. Se eligió éste por su fiabilidad y porque su luz se puede transmitir eficazmente a través de las fibras clásicas de cuarzo. Sin embargo, en tales experimentos se puso de manifiesto que la luz verde absorbida producía lesiones térmicas difusas en los tejidos vecinos y no destruía convenientemente la placa. Se superaron estos problemas con el uso de un haz láser intermitente ultravioleta o infrarrojo. Recientemente, Warren S. Grundfest, James S. Forrester y Frank Litvack valoraron un sistema basado en un láser excímero ultravioleta y una fibra de cuarzo. Su sistema ha permitido limpiar eficazmente las arterias coronarias de varios enfermos.

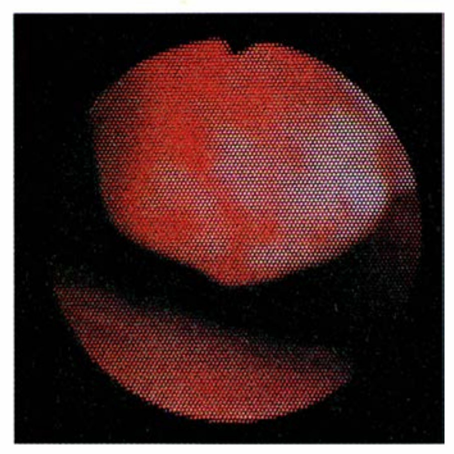
Los principales problemas pendientes son cómo manipular el haz láser en el interior de la arteria y cómo distinguir, de los alterados, los segmentos normales de la arteria antes de utilizar el láser para destruir el tejido. En el futuro, técnicas más "elegantes", basadas en la fluorescencia endoscópica, llevarán a cabo esas tareas y evitarán la perforación de los vasos sanguíneos.

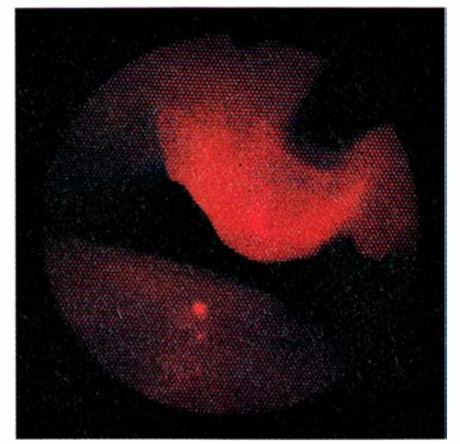
Mis colegas y yo, de la Universidad de Tel Aviv, creemos que, en un futuro próximo, fibras ópticas nuevas, capaces de transmitir la radiación infrarroja de un láser de dióxido de carbono permitirán diseñar un sistema más seguro, duradero y eficaz. Hemos sometido a prueba esa técnica implantando arterias humanas bloqueadas por placas ateroescleróticas en animales. Introducíamos luego las fibras en las arterias y, mediante un haz láser de dióxido de carbono, desobstruíamos los vasos.





5. RADIOGRAFIAS de las arterias femorales en las que puede comprobarse el éxito de un tratamiento mediante angioplastia con catéter de balón y con láser. En la radiografía de la izquierda, la arteria se encuentra totalmente bloqueada. Después de aplicarse luz láser en el lugar de obstrucción, sólo permanece un 30 por ciento de la oclusión original (*centro*). Para eliminar el bloqueo residual, se puede hinchar un catéter de balón en la arteria. Cuando se retira el catéter, se restablece el flujo sanguíneo normal (*derecha*).







6. TUMOR obstructor de la tráquea (*izquierda*), tratado mediante terapia fotodinámica. Se le inyecta al enfermo un colorante que el tumor absorbe con más facilidad que los tejidos sanos. Una fibra óptica introducida en el tumor (*fotografía central*) emite luz láser que altera químicamente al colorante. Tal y como puede verse dos días después (*fotografía de la derecha*), el colorante alterado ha matado las células del tumor; es el momento en que éste puede ya extirparse.

Dado el estado alcanzado por la técnica, no pasarán muchos años hasta conseguir refinar los instrumentos quirúrgicos e incorporarlos en dispositivos que porten un fibroscopio y distintos sensores. Probablemente, el diámetro de ese endoscopio láser no llegará al par de milímetros; el fibroscopio ocupará aproximadamente la mitad de ese espacio. El dispositivo llevará también una fibra para transmitir luz láser infrarroja, ultravioleta o visible. Los sensores de fibra óptica servirán para medir la presión de la sangre, la temperatura y el flujo; otro canal permitirá la extracción de gases y fluidos a través del endoscopio.

Este nuevo endoscopio podría introducirse en la arteria coronaria, como si fuera un catéter normal. El médico observaría la obstrucción y mediría la presión y el flujo sanguíneos. La circulación de la sangre se podría detener con un balón; una solución salina transparente inyectada a través del canal de irrigación limpiaría la zona de la sangre restante. Entonces, se emitiría un haz de luz láser a través de la fibra correspondiente para destruir la placa obstructora. Los gases liberados por la vaporización de la placa se extraerían a través del canal de aspiración o por el propio organismo. Los sensores de fibra óptica, conectados a un procesador informatizado, seguirían todo el proceso y avisarían en caso de sobrecalentamiento del extremo de la fibra o de destrucción de un vaso sanguíneo sano. Al terminarse la angioplastia, se deshincharía el balón y se mediría el flujo de sangre para confirmar que se ha desobstruido totalmente la arteria coronaria tratada.

Otra aplicación en desarrollo es el uso de las fibras ópticas para la detección y tratamiento de pequeños tumores malignos. Cierto método diagnóstico llamado endoscopio de fluorescencia se ha manifestado muy eficaz a la hora de localizar tumores pulmonares que son demasiado pequeños para ser detectados por la tomografía axial computerizada (TAC) o por rayos X. Si se inyecta a un enfermo un derivado hematoporfirínico, un colorante que emite fluorescencia roja bajo la radiación ultravioleta, al cabo de varios días los tumores absorben mucha más cantidad de esa sustancia que los tejidos sanos. Si se ilumina la región sospechosa con una fuente de luz ultravioleta apropiada, una fibra de cuarzo asociada a un láser de criptón por ejemplo, se puede descubrir el tejido maligno por su emisión de luz roja. Para detectar la luz roja, se acopla al haz de imagen un filtro que la transmite y que elimina la luz ultravioleta reflejada.

Si bañamos el tejido con luz roja de suficiente intensidad en vez de luz ultravioleta, los resultados difieren bastante. El derivado hematoporfirínico absorbe intensamente la luz roja. La energía absorbida desencadena una serie de reacciones fotoquímicas que destruyen los tejidos malignos que estaban saturados del derivado hematoporfirínico. Un láser de vapor de oro puede proporcionar luz roja de alta intensidad, que se transmite a través de una fibra de cuarzo y se libera directamente en el interior del tumor. Esa luz destruye entonces, de forma selectiva, las células cancerosas. Actualmente, esta terapia fotodinámica se encuentra en fase de experimentación clínica.

En un futuro próximo, ambos sistemas, diagnóstico y quirúrgico, podrán conjugarse en un mismo endoscopio de láser para tratar los tumores. El dispositivo incluirá un fibroscopio, una primera fibra de cuarzo para transmitir la luz ultravioleta excitante y otra fibra de cuarzo que transmita la luz roja para la terapia fotodinámica. El endoscopio se introducirá a través de un orificio natural o a través de la piel para alcanzar el posible tumor. La luz láser ultravioleta se transmitirá por la primera fibra, y la imagen fibroscópica se observará a través de un filtro transmisor del rojo. Se identificarán los tejidos malignos por su emisión roja y se enviará luz roja de alta intensidad a través de la segunda fibra de cuarzo para destruirlos. La fibra de cuarzo puede penetrar directamente en el interior de los tumores. Tras una pausa de semanas (o de varios tratamientos), se podrá repetir la técnica para asegurarse de que se ha detenido el crecimiento del tumor.

Los fibroscopios flexibles, los sensores ópticos y los sistemas de emisión de energía láser abren una nueva era de técnicas médicas apenas invasivas. Los endoscopios láser incluirán un fibroscopio completo que incorporará haces de imagen y transmisores de luz, fibras ópticas asociadas a sensores de diagnóstico, una fibra de energía para transmitir radiación láser y un canal para inyectar líquidos y aspirar líquidos o gases. La calidad de imagen de una televisión de alta definición, la precisión de un laboratorio médico y la pericia de un equipo quirúrgico se dan la mano en un instrumento que se puede introducir a través de los vasos más pequeños del organismo: así es el futuro de las fibras ópticas en medicina.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

HANDBOOK OF FIBER OPTICS: THEORY AND APPLICATIONS. Dirigido por H. F. Wolf. Granada Publishing, Inc., 1979.

LASERS IN SURGERY. John A. Dixon en *Current Problems in Surgery*, vol. 21, n.º 9; septiembre de 1984.

OPTICAL FIBERS IN MEDICINE IV. En *Proceedings of the Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers*, dirigido por A. Katzir, vol. 1067; junio de 1989.

Henry Norris Russell

Russell, astrónomo destacado de su generación, comprendió la necesidad de apoyar la astronomía sobre una firme base teórica; al hacerlo, contribuyó a la creación de la astrofísica moderna

David H. DeVorkin

En julio de 1923 George Ellery Hale recibió el siguiente informe de uno de los miembros de su equipo destacado en el observatorio del monte Wilson, sobre lo que ya se había convertido en un grato ritual veraniego:

"Henry Norris Russell llegó, 'pisando fuerte', y... con las alforjas llenas. La charla se convirtió en un monólogo, que no se interrumpió mientras permaneció aquí. Nos dio tres o cuatro charlas por semana sobre las series espectrales aplicadas a la estructura atómica... Dedicó la mayor parte del tiempo, hasta el último instante de su visita, al cálculo de las series del titanio, según las selecciones resultantes de la clasificación del horno. Resultó ser más complejo de lo que esperaba, y todavía está trabajando en ello, pero se efectuó la clasificación fundamental y se aclaró en qué consistía el carácter de los multipletes..."

Ese era Henry Norris Russell en la flor de la vida: un chorro de ideas y sugerencias sobre el entronque de la astronomía espectroscópica en la física moderna. Era el Russell del diagrama de Hertzsprung-Russell, el del método Russell de las binarias que se eclipsan, el del acoplamiento Russell-Saunders de espectros de dos electrones y el de la *Astronomy: Analysis of Stellar Spectra* de Russell, Dugan y Stewart, que contribuyó a la formación de dos generaciones de astrónomos. Y ése era el Russell que colaboró en las páginas de *Scientific American* durante más de cuarenta años con su sección mensual de astronomía.

Hale llevó a Russell, inquieta fuente de energía, a monte Wilson para sacar partido del aluvión de información allí concentrado sobre los espectros celestes y de laboratorio; deseaba también que orientara a los astrónomos para que consolidaran sus estudios de observación con las posibilidades interpretativas que proporcionaba la física moderna. Hale confiaba en que Russell y otros físicos acabarían por salvar el hiato existente entre el banco del laboratorio y la cúpula del observatorio. Dar con ese puente se convirtió en la razón de ser de Russell, de su vida profesional, amén de reflejar el estado de una ciencia en proceso de transición.

Hijo mayor de un pastor de Oyster Bay, Long Island, fue enviado, en 1889, a sus doce años, a vivir con su tía materna en Princeton, con objeto de que se beneficiara de las buenas escuelas que allí existían. De su madre, Eliza Norris, había heredado el talento para las matemáticas y la resolución de enigmas, así como un profundo sentido del deber. Dotado también de una memoria prodigiosa, se graduó en la Escuela Preparatoria de Princeton a los 16 años y pasó a la universidad del mismo lugar, donde estudió matemáticas y astronomía. En su época de formación recibió la influencia de Charles A. Young, pionero de la espectroscopía solar, y preparó una tesis de licenciatura sobre la clasificación visual de los espectros estelares. En los cursos de segundo ciclo tuvo por tutores a Young, al matemático Henry B. Fine y al astrónomo E. O. Lovett. Esta combinación de matemáticas y observación convergió en una oportuna tesis doctoral: el estudio matemático de la perturbación que Marte inducía en la órbita de un asteroide, descubierto recientemente, llamado Eros; el análisis conduciría a un valor más preciso de la distancia entre la Tierra y el Sol.

No pasó inadvertido, en esa época, su modo de proceder: una aguda capacidad para conseguir nuevas técnicas de cálculo. Ideó vías de resolución de las masas de las estrellas de sistemas binarios visuales y trazó caminos para determinar las densidades de estrellas variables del tipo Algol, consideradas por la mayoría de astrónomos de entonces un tipo especial del sistema binario eclipsante. Pronto vio que otros competidores tomaban parte también en la carrera: Hendrikus J. Zwiers le venció, con casi dos años de anticipación, en la técnica del binario visual, y Alexander Roberts propuso la técnica Algol más o menos al mismo tiempo que Russell.

Los primeros roces con sus competidores sólo sirvieron para espolearle todavía más. Tras defender la tesis en 1900, su salud se resintió por el exceso de trabajo, pero se recuperó al año siguiente con un viaje por Francia. En 1902 se dedicó al trabajo postdoctoral en la Universidad de Cambridge, donde su ambicioso programa de trabajo de observación y teórico sobre las paralajes trigonométricas de las estrellas quedó interrumpido, una vez más, por una grave enfermedad, quizás una depresión nerviosa. Dejando su trabajo inacabado, regresó a Princeton en 1905. Ocupó una plaza en la facultad y se pasó los cinco años siguientes intentando poner orden en las características de las estrellas que se habían calculado y observado: su brillo intrínseco, colores, masas, densidades y espectros.

Para realizar este estudio se basó, principalmente, en los espectros estelares que aportara Edward C. Pickering, director del Observatorio del Harvard College, cuyo ejército de ayu-

DAVID H. DEVORKIN, encargado de historia de la astronomía del Museo Aeroespacial de la Institución Smithsoniana de Washington, se formó en astronomía y astrofísica en las universidad de California en Los Angeles, estatal de San Diego y Yale. En 1978 se doctoró en historia de la ciencia por la Universidad de Leicester. Sus intereses principales se centran en la evolución de la astrofísica moderna y los orígenes de la ciencia espacial. El autor agradece el permiso concedido por la sección de manuscritos de la biblioteca universitaria de Princeton para citar la correspondencia de Henry Norris Russell.

dantes femeninos —Annie J. Cannon en particular— fue el que reunió la mayor colección de espectros estelares y brillos aparentes del mundo. Pickering le sugirió a Russell que comparara el brillo absoluto que pudiera derivar de las paralajes de sus estrellas de Cambridge con sus espectros de la colección de Harvard.

El resultado final de esta investigación fue el famoso diagrama de Hertzsprung-Russell. (El astrónomo danés Ejnar Hertzsprung lo concibió independientemente entre 1908 y 1910.) Este diagrama, que Russell publicó en 1914 [*véase la figura 2*], muestra cómo casi todas las estrellas pueden clasificarse según su brillo y color; ha servido también para orientar a los teóricos en su búsqueda de una explicación coherente de la evolución estelar.



1. HENRY NORRIS RUSSELL (1877-1957) nació en Oyster Bay, Nueva York. Desde los 12 años pasó la mayor parte de su vida en Princeton. El "decano de los astrónomos norteamericanos" es recordado como el codescubridor del diagrama de Hertzsprung-Russell, que pone en relación el brillo de las estrellas con sus colores, y del acoplamiento de Russell-Saunders, que describe las interacciones de dos electrones en los espectros atómicos. A partir de 1919, cuando Meghnad N. Saha desarrolló una teoría de la ionización basada en la mecánica cuántica, centró su esfuerzo en la comprensión física de los espectros estelares.

Durante esos años, el propio Russell estaba desarrollando una teoría de la evolución estelar (su teoría de las gigantes y enanas), basada en una hipótesis anterior de Norman Lockyer. En el marco de la misma, la estrella comienza su vida en forma de nube de gas muy expandida (una gigante roja), para contraerse y calentarse bajo la propia gravitación hasta un punto crítico en el que deja de comportarse como un gas perfecto. Luego se enfría (en calidad de densa estrella enana), a medida que se contrae más, y pasa el resto de su vida enfriándose y contrayéndose hasta que desaparece. Conviene recordar que, por esa fecha, no se conocían las reacciones nucleares y que la teoría se fundaba sólo en la atracción de gravitación y la teoría cinética del calor. Los astrónomos contaban además con pocas pruebas que mostraran que las estrellas se comportaban como gases perfectos. La relación entre la física moderna y las estrellas era aún endeble.

Los años 1911 y 1912 habrían también de ser testigos de otra aportación russelliana: el primer método rápido y eficaz de derivar los parámetros orbitales y las características físicas de las estrellas binarias que se eclipsan: el que andando el tiempo se llamaría método Russell de las binarias que se eclipsan.

En reconocimiento a su trabajo en astronomía estelar, se le nombró profesor titular de Princeton en 1910; allí se quedó hasta el fin de sus días. Si bien huyó de la política y no creó institución alguna, cuando estalló la primera guerra mundial se había convertido ya en figura cimera de la astronomía americana, con prestigio suficiente para dictar programas de investigación y encarrilar la vida profesional de quienes trabajaban fuera de los muros de Princeton. Un antiguo alumno, Harlow Shapley, se convirtió en el director del Observatorio del Harvard College en 1921. Hale, Edwin B. Frost y Otto Struve, directores sucesivos del *Astrophysical Journal*, recurrieron a Russell en busca de criterio sobre lo digno de publicarse en la revista.

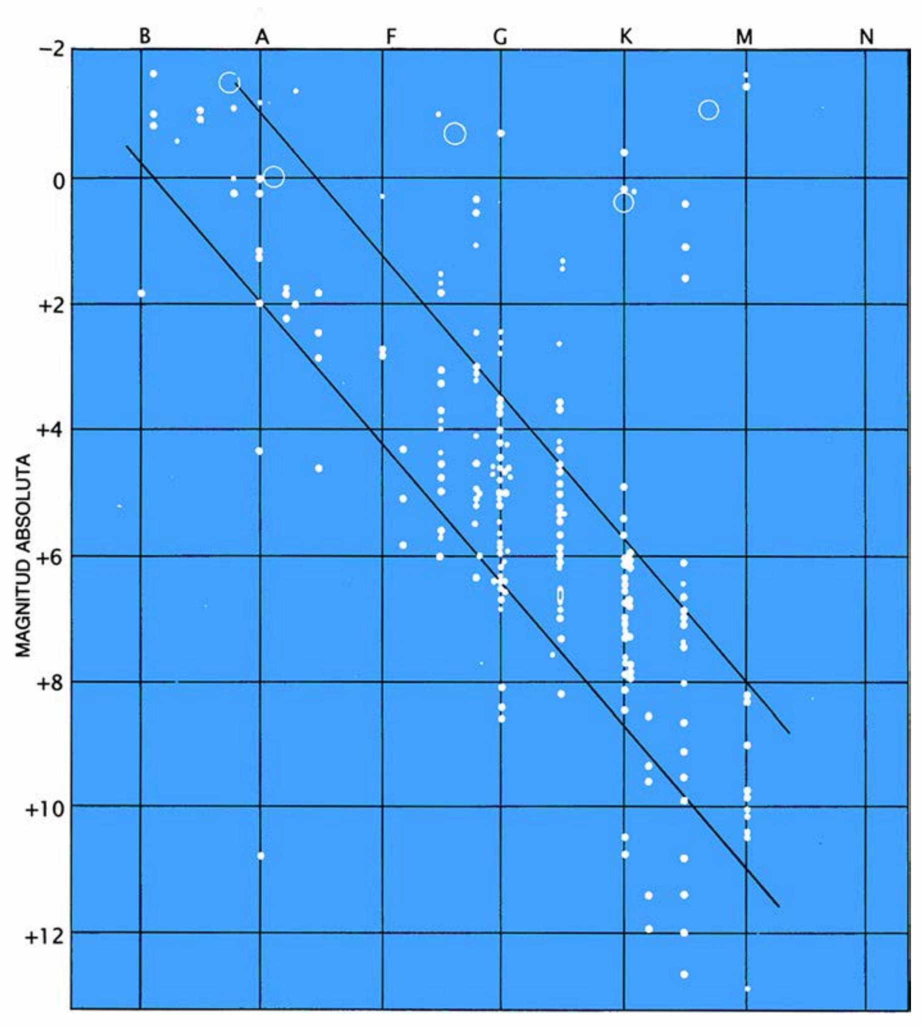
No eran muchos los discípulos de Russell, pero sí los mejores. Donald H. Menzel se propuso comprender las capas externas del Sol y la física de las nebulosas gaseosas; en 1954 se convirtió en director del Observatorio del Harvard College. Lyman Spitzer, Jr., inició la aplicación de la física del plasma a las estrellas y se hizo cargo del Observatorio de la Universidad de Princeton al jubilarse Russell en 1947. Y cuando Struve oteó el panorama astronómico de la década de 1930, vio que el único sitio hacia donde uno podía dirigirse para aprender astrofísica teórica era Princeton, junto a Henry Norris Russell.

La primera guerra mundial obligó a Russell a concentrarse en la navegación aérea y la telemetría sonora; no olvidó, sin embargo, diseñar el futuro de la astronomía norteamericana. El punto sólido del país era el trabajo de observación: podía presumir de los mayores telescopios del mundo y de los cielos más despejados. El Observatorio del Harvard College, el de Lick y el de Yerkes en Wisconsin se dedicaban plenamente a las investigaciones estelares que se habían iniciado antes de acabar el siglo.

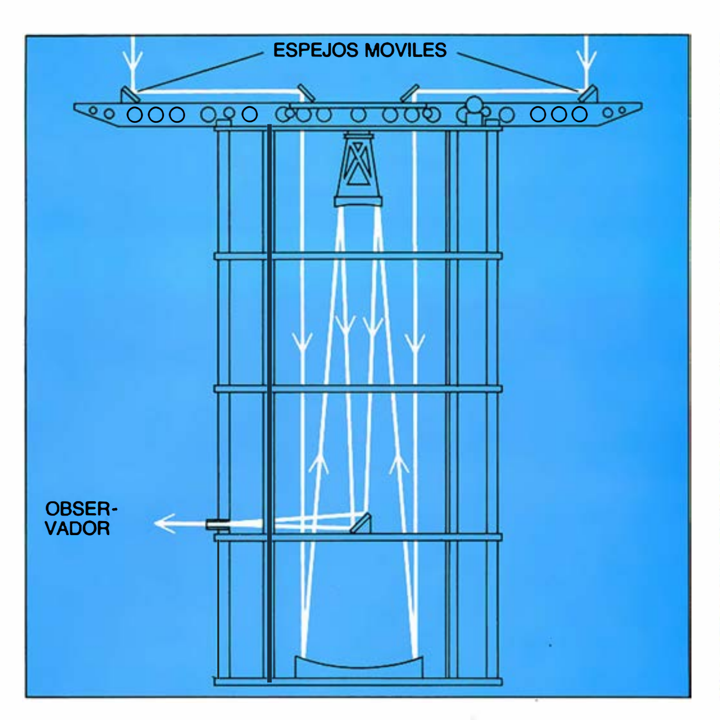
Russell comprendió, sin embargo, que Estados Unidos iba a la zaga de Europa en astrofísica teórica. Empezó por cuestionar los proyectos de catalogación, inacabables, que levantaban el mapa del cielo, más detalladamente cada vez, sin contar con las bases teóricas adecuadas. Siglos antes, las leyes de Newton habían servido para describir el movimiento orbital de los cuerpos celestes; ¿qué leyes de la física de radiación y la mecánica cuántica fraguada por Planck, Bohr y Einstein, describirían la estructura estelar?

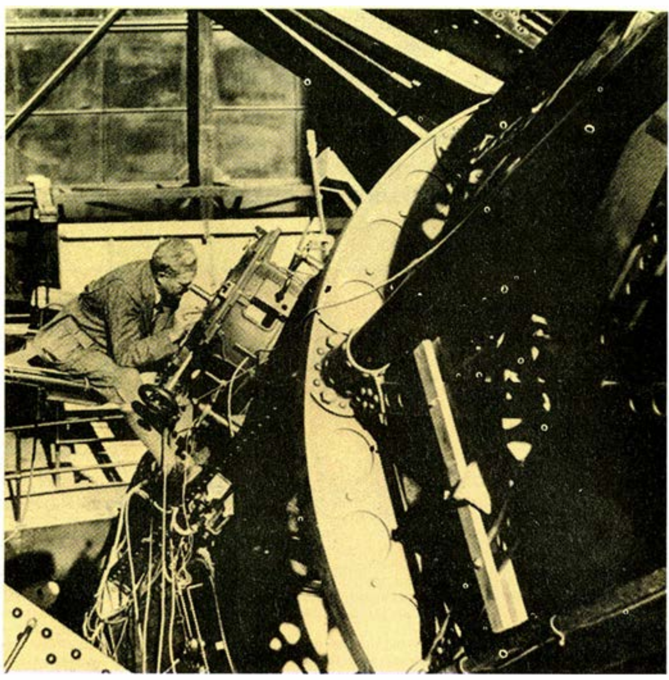
Russell y otros creían que debía hacerse frente a tales cuestiones antes de preparar nuevos programas de observación. En 1916 cuestionó abiertamente el trabajo que su viejo amigo y patrón, Pickering, había realizado durante toda su vida: "Aún se da demasiado a menudo el caso de comenzar el trabajo rutinario prematuramente, antes de refinar el método". En 1917 Hale le





2. DIAGRAMA DE HERTZSPRUNG-RUSSELL, desarrollado de manera independiente por el danés Ejnar Hertzsprung y Russell entre 1908 y 1913. En dicho diagrama, el brillo absoluto o magnitud de las estrellas (*eje vertical*) se traza en función de la clasificación espectral de las mismas (*eje horizontal*), que va del azul (*O*) al rojo (*M*). La mayoría de las estrellas entran en la llamada serie principal; transcurren diagonalmente desde la parte superior izquierda hasta la inferior derecha. Las gigantes rojas se encuentran en la parte superior derecha; las enanas blancas, en la inferior izquierda. Gran parte de la astrofísica del siglo xx se ha empeñado en la búsqueda de una interpretación teórica del diagrama. El mostrado aquí es el de la primera versión publicada de Russell. Los círculos representan varios niveles de confianza de las paralajes estelares.





3. EL INTERFEROMETRO DE MICHELSON se montó encima del telescopio de 2 metros y medio de monte Wilson en 1920. La luz de una estrella se refleja en dos espejos móviles que se hallan en el extremo de la viga de 6 metros de longitud; los dos haces de luz confluyen en el foco del telescopio, allí se combinan, o interfieren. Si se mueven los espejos, las franjas de interferencia pueden desaparecer; la separación de los espejos en aquel punto indica la dimensión angular de la estrella. Con esta técnica, el poder de resolución del telescopio pasa a equivaler el de un telescopio dotado con un espejo de 6 metros de diámetro. El instrumento se construyó bajo la supervisión de Albert A. Michelson, y a finales de 1920 Francis G. Pease (que aparece en la fotografía) determinó por vez primera la dimensión angular de una estrella, Betelgeuse, con los espejos que un ayudante del turno de noche, sentado en el haz, colocó a mano.

pidió a Russell que preparara un informe para el Consejo de Investigación Nacional, de reciente creación. En su escrito Russell sostuvo que podían reforzarse muchos campos de la astronomía moderna si se establecía un vínculo más estrecho con la física teórica. Y de nuevo, en 1917, le escribió a Pickering sobre el trabajo que el ayudante de este último estaba realizando:

"Para ser sincero, me parece que la señorita Cannon se ha preocupado más por el *aspecto* de los espectros que por lo que éstos *significan*. No creo que ello reste valor al servicio que ha prestado a la astronomía; por el contrario, su estricta atención a los hechos, pasando por alto las teorías actuales, le ha conferido una aptitud peculiar para su gran trabajo."

Pickering entendió que el programa de observación de Harvard no había sido representado de forma adecuada en el Consejo de Investigación Nacional, y replicó que quizá, para bien del progreso astronómico, sería conveniente "que el soñador sugiriera al hombre práctico los hechos que precisa". La discusión nunca pasó a más. Cuando Pickering murió en 1919 Russell le rindió homenaje: "fue la información espectroscópica que [Pickering] me envió para mis estrellas de paralaje, donación gratuita concedida a un joven y desconocido estudiante, lo que me puso sobre la pista que conducía a la teoría globalizadora de las gigantes y enanas. No creo que jamás existiera hombre de ciencia más generoso".

A pesar de esas palabras de gratitud, se mantuvo firme en su convicción de que la dirección de la astronomía tenía que cambiar. Se lo había escrito a Pickering en 1917. "Me parece que la astronomía actual es como un ejército que avanza en dos flancos: uno que sigue la línea de la observación rutinaria y otro que recorre la de la investigación de los principios. Si los flancos no se mantienen en continuo contacto, el ejército no llegará muy lejos." Russell se autoimpuso la tarea de conducir el flanco teórico de la astronomía norteamericana y transformarlo en la astrofísica moderna.

Retórica aparte, en los años subsiguientes a la primera guerra mundial Russell navegaba sin rumbo. Entre 1914 y 1919 había publicado 26 trabajos astronómicos, de 15 categorías: estrellas binarias, órbita lunar, energía y evolución estelares, magnitudes y masas estelares, paralajes, estrellas variables, etcétera. El trabajo era bueno, pero no constituía el hito que señalara el camino del futuro.

El informe al Consejo Nacional de Investigación de 1917 demuestra que Russell sabía que la clave de aplicar las revelaciones de Planck, Bohr y Einstein a la estructura y evolución de las estrellas se fundaba en el análisis de los espectros estelares; aun así le pusieron trabas cuando intentó ponerlo en práctica. En aquella época los astrónomos sólo podían identificar los elementos químicos que producían ciertas líneas de emisión o absorción comparándolos con los modelos del laboratorio. Podían clasificar las estrellas según sus espectros, pero sólo de modo cualitativo: por la ausencia o la presencia de líneas y por la intensidad de las mismas. No se comprendían bien los mecanismos físicos que había tras las características de emisión o absorción. Russell y otros reconocieron que la diferencia en la temperatura estelar era la principal causante de los espectros discrepantes; la composición estelar constituiría probablemente sólo una causa secundaria. Pero este enfoque tenía acérrimos detractores. Nadie sabía por qué razón física los cambios de temperatura originaban diferentes características espectrales de las estrellas.

Tampoco pisaban más firme los astrónomos con respecto a los espectros continuos: el irisado fondo continuo sobre el cual se superponen las líneas de emisión o absorción de una estrella. Resultado, en buena parte, de la excelente colorimetría realizada en Alemania, existía cierta seguridad de que

la cantidad de radiación emitida por una estrella en una banda de longitud de onda dada (el índice de color de ésta) se asemejaba algo al famoso espectro del cuerpo negro de Planck, que es el espectro de un objeto teórico cuyas propiedades de radiación dependen exclusivamente de la temperatura. Pero el vínculo era hasta ahora débil; además, muchas estrellas no parecían comportarse en absoluto como cuerpos negros.

Russell no fue el único en reconocer la necesidad imperiosa de dominar mejor los espectros estelares. Su principal colega en Inglaterra, Arthur Stanley Eddington, de Cambridge, compartía su opinión. La fórmula de Planck determina la cantidad de radiación que emite un objeto por área unidad en un ángulo sólido: el brillo de su superficie.

12 SCIENTIFIC AMERICAN July 2, 1921

The Heavens for July, 1921

What a Study of Atoms aud Electrons Tells Us of the Stars

By Henry Norris Russell, Ph.D.

IT is becoming more and more evident, as both sciences advance, that the astronomy of the future will be intimately associated with and dependent upon the concepts and the results of physics, and especially of that branch of physics which deals with the constitution and properties of atoms. Our knowledge within the latter field has been very greatly extended within the last decade, and many astronomical observations which before were puzzling have thereby been explained.

This is particularly true in the realm of spectroscopy. The main facts regarding the emission of light by hot bodies, and by hot gases in particular, have been known for many years; but it is only recently that we have even begun to have an idea of the processes taking place inside the atoms of the gas, which are involved.

For example, when the vapor of a given element, such as calcium or iron, is confined in a heated tube or "furnace" and observed through the end of the tube, the spectrum of the light which it emits shows certain bright lines. If the temperature is raised these lines grow stronger and new lines appear in addition. When the same metal is brought into an electric arc (which is hotter, and also subject to direct electrical action), more lines appear; while a yet more advanced stage may be reached by passing a powerful spark, fed by a source of current of high tension, between two bits of the metal; and in the spectrum from this lines may be found which were not to be observed at any of the lower stages of temperature.

Extensive studies have been made of these phenomena, and long lists of "furnace" and "spark" lines compiled, with important astronomical applications. But the physical explanation, from the atomic standpoint, lagged behind, and came only with the application of the modern quantum theory, which has been remarkably successful.

Why Are the Spectral Lines?

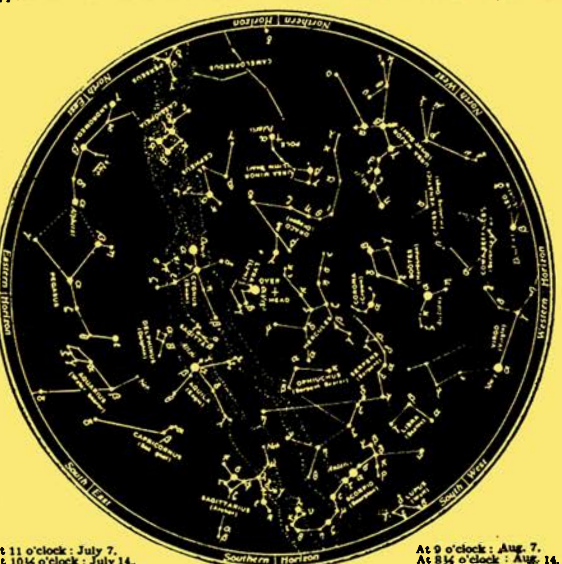
We have good reason to believe that an atom of any element consists of a central, and very small, nucleus, carrying a positive electrical charge, surrounded by a number of negatively charged electrons, which under the system of forces acting between them and the nucleus arrange themselves automatically in a definite pattern, probably consisting of several concentric shells or layers, at least in the heavier atoms. In the hydrogen atom there is but one electron; in helium two; in oxygen eight; in sodium eleven; in iron twenty-six; and so on up to 82 for lead and 92 for uranium. The inner electrons are held by very powerful forces, and are hard to dislodge; but a few of the outermost are relatively easy to displace, and it is these which are concerned in the chemical affinity between atoms of different sorts, and also in the production of the radiation of the visible spectrum. To pull one of these electrons away from the rest of the atom, or as it is called to ionize the atom, demands a certain expenditure of energy; and this produces an absorption of light by the gas of which this atom is a part. When some other free electron comes near to the ionized atom, it will be attracted to it (provided it does not go by too fast); and, in falling back, a corresponding amount of energy will be emitted in the form of light radiated by the gas.

Recent research has shown that this is but part of the story. There appear to be many different positions in which the electron can stop, short of being pulled clear away from the atom. The farther out it gets the more energy is required to raise it—the greatest amount of all corresponding to the complete removal of the electron, or the ionization of the atom.

Now when an electron changes from one of these states to another, light is absorbed, if it is pulled up to a "higher level" nearer the outside of the atom, or emitted if it drops to a "lower level"; and this light consists of vibrations at a perfectly definite rate, giving a sharp line in the spectrum. The most remarkable feature remains to be mentioned. The number of light vibrations per second is exactly proportional to the amount of energy which is required to pull the electron up from one position to the other, or is liberated when it comes back. The reason for this famous "quantum relation"—and indeed the reason why the various possible positions for the electron should exist at all—remains still a mystery, which is regarded by the ablest physicists as one of the hardest problems of science. But the fact has been tested in so many ways that no doubt remains.

When the spectra of the elements are studied from this standpoint it is found that the furnace lines correspond (in the case of absorption) to the raising of the electron from the very lowest "level" at which it normally is situated in the undisturbed atom to various higher levels; while the arc lines, in general, correspond to the raising of the electron from one of these higher levels to another. When light is emitted we have to do with an electron falling back over one of the same intervals.

The enhanced lines correspond to still another process. After one electron has been taken clear out of the atom, it is often possible, by a greater force, to pull a second electron out, and doubly ionize the atom. In this process too there are various possible "levels" between which the second electron may shift, and a corresponding set of lines, all quite different from the furnace or arc lines. It is even possible that an atom may lose a third or actually a fourth electron, and there is reason to suppose that some spectral lines, produced only in very violent sparks, are of this origin.



At 11 o'clock: July 7.
At 10½ o'clock: July 14.
At 10 o'clock: July 22.
At 9½ o'clock: July 30.
At 9 o'clock: Aug. 7.
At 8½ o'clock: Aug. 14.
At 8 o'clock: Aug. 22.

The hours given are in Standard Time. When local summer time is in effect, they must be made one hour later: 12 o'clock on July 7, etc.

NIGHT SKY: JULY AND AUGUST

What It Means to the Astronomer

With these ideas in mind it is very easy to see why the furnace lines are characteristic of the red stars, like Betelgeuse; the arc lines of yellow stars, like the sun; and the spark lines of very white stars, like Sirius. In the hot atmospheres of the stars, the atoms collide and jostle one another. The red stars are the coolest, and the collisions are the least violent, so that most of the atoms are in their undisturbed condition, and absorb only the flame lines. In the hotter atmosphere of the sun many of the atoms are jostled so that the electrons within them are raised to higher "levels" and are in a position to be raised further, with absorption of the arc lines. Finally, in the still hotter white stars most of the atoms are completely ionized, and are therefore ready to have a second electron removed, with absorption of the light corresponding to the spark lines. For some elements, such as calcium, this process occurs with relative ease; hence the spark lines of calcium—the great H and K lines in the violet—appear strongly in the sun. Helium on the other hand is the most difficult of all the elements to ionize; and the amount of energy required even to lift an electron from the lowest "level" to the next above is so great that the corresponding light vibrations are exceedingly rapid, and lie so far in the ultra-violet that all ordinarily transparent substances are opaque for them. The visible lines of helium correspond to a lifting of an electron from the second, or even a higher level to one still above, and can only be produced in an atom which has already been violently jostled, so as to throw the electron up to the second "level." This explains why the absorption lines of helium are found only in the very hot stars, like those in Orion. Spark lines of helium, corresponding to the loss of a second electron, are known; but these are found only in a very few stars which, from other evidence as well, we have reason to believe to be the hottest in the heavens.

Many beautiful applications of this theory have recently been worked out by an Indian physicist, Dr. Megh Nad Saha, of the University of Calcutta. Much of the foregoing discussion is adapted from his work, and one more instance of it may be given. The dark lines of sodium are strong in the solar spectrum. Those of potassium are present, but weak. The rare alkali metals, rubidium and caesium, show many strong lines but these do not appear in the sun at all. This has long been a puzzle, but Dr. Saha has given the solution.

Laboratory experiments have shown that it is fairly easy to remove an electron from a sodium atom, easier to get one out of a potassium atom, and still easier for rubidium and caesium. To get a second electron away from any of these atoms, after the first is gone, is however very difficult. Calculation shows that, in the sun's atmosphere, sodium vapor should be largely ionized, with however a considerable percentage remaining un-ionized atoms, which still retain one electron that may be removed by the action of light, with absorption of the well-known sodium lines. For potassium, almost all the atoms are ionized, leaving very few in a position to produce the absorption lines. Rubidium and caesium, still easier to ionize, would be completely ionized, leaving no atoms at all in a position to produce the absorption lines which are so conspicuous under the less extreme conditions of our laboratories. Hence the weakness of the potassium lines, and the absence of those of the other elements, is completely explained.

When more laboratory work has been done (largely by electrical methods) on these matters, it probably will be possible to calculate with fair precision the temperatures of the atmospheres of the various types of stars, simply from a knowledge of the degree to which the various sorts of atoms in them are ionized, as indicated by the lines in their spectra.

The Heavens

At our hour of observation Vega is almost overhead. Cygnus is high in the east, and Aquila in the southeast, a little lower. Below it lie Capricornus and Aquarius, and to the right, due south, is Sagittarius, with Scorpio to the west of it, and Ophiuchus above the latter. Bootes is the most conspicuous western constellation, with Corona above it and Hercules almost overhead. Ursa Major is in the northwest, Ursa Minor and Draco in the north, Cassiopeia and Cepheus in the northeast, and Pegasus has just risen in the east.

The Planets

Mercury is an evening star at the beginning of the

(*Continued on page 16*)

Para confirmar que una estrella se comporta como un cuerpo negro, debe entonces conocerse el ángulo sólido que subtiende o, de modo equivalente, su diámetro aparente. A la inversa, si suponemos que una estrella se comporta como un cuerpo negro y se conoce el brillo de su superficie, puede predecirse su diámetro aparente.

En 1920 Eddington observó, en su discurso presidencial ante la Asociación Británica para el Progreso de la Ciencia, que "probablemente la mayor necesidad de la astronomía estelar en el día de hoy, para garantizar que nuestras deducciones teóricas comiencen en las directrices correctas, sea un sistema de medir el diámetro angular aparente de las estrellas". Se puso entonces a calcular, en razón de su índice de color, la temperatura y brillo de la superficie de Betelgeuse; demostró que, si se comportaba como un cuerpo negro, debería subtender 0,051 segundos de arco, lo que viene a ser 1/36.000 del diámetro angular de la Luna.

Pronto se confirmó esta teoría. Eddington y Russell sabían que en monte Wilson se estaba construyendo una herramienta astronómica totalmente nueva, bajo la dirección de Albert Abraham Michelson, que podía determinar las separaciones de estrellas dobles próximas o incluso el diámetro angular de las estrellas: un interferómetro óptico gigante de 6 metros, que se instalaría encima del recientemente inaugurado telescopio de Hooker de 2 metros y medio [*véase la figura 3*]. Hale, que se encontraba entonces en Pasadena, acababa apenas de entregar su original del número 2 de *Nature* de septiembre, en el que se había reeditado el discurso de Eddington, cuando cogió la pluma para informar a Michelson que por fin contaban con una predicción aceptable del diámetro angular de una estrella. El interferómetro de Michelson ya estaba en marcha en diciembre y quedó confirmada la predicción de Eddington. Esta fue la primera comprobación basada en la observación de que las estrellas se comportan realmente según las leyes de la física moderna.

Russell había predicho también el diámetro de Betelgeuse, y su predicción apareció publicada a finales de diciembre. Si bien se acercaba al valor observado, la predicción de Eddington era más exacta. Aunque Michelson admitió más tarde la predicción de Russell, éste comprendió, a raíz de este episodio, que el futuro de la astronomía se centraría principalmente en los métodos de la escuela de Cambridge, que estaba aplicando la física al estudio de las estrellas.

Otro acontecimiento, producido en diciembre de 1920, lo cambió todo. Ese mes llegó a manos de Russell un ejemplar del número de octubre de *Philosophical Magazine*. En él, un oscuro y joven físico indio de Calcuta, Meghnad N. Saha, relacionaba con osadía el grado de ionización y el potencial de ionización de un elemento químico (la energía necesaria para separar del núcleo un electrón) con la temperatura y la presión del medio ambiente. Russell reconoció enseguida que ahí se encerraba la llave maestra de los espectros estelares que andaba buscando. Escribió a Walter S. Adams, uno de sus colaboradores en monte Wilson: "Creo que dentro de unos años podremos aprovechar el conocimiento de los potenciales de ionización, etcétera, para obtener las determinaciones numéricas de las temperaturas estelares a partir de datos espectroscópicos".

Al trabajar con el átomo de Bohr, Saha había aplicado los conceptos de equilibrio termodinámico y de ionización térmica a las atmósferas estelares. Según el modelo de Bohr, al chocar un fotón con un átomo, puede excitar a un electrón para que pase de un nivel de energía a otro; el fotón queda absorbido durante el proceso. A la inversa, un electrón que pase de un mayor nivel de energía a otro menor emitirá un fotón. Saha era consciente de que esas nociones podían contribuir a aclarar el comportamiento de los átomos de las atmósferas estelares. Demostró en particular por qué las líneas espectrales de un elemento dado son más intensas en algunas temperaturas y más débiles en otras.

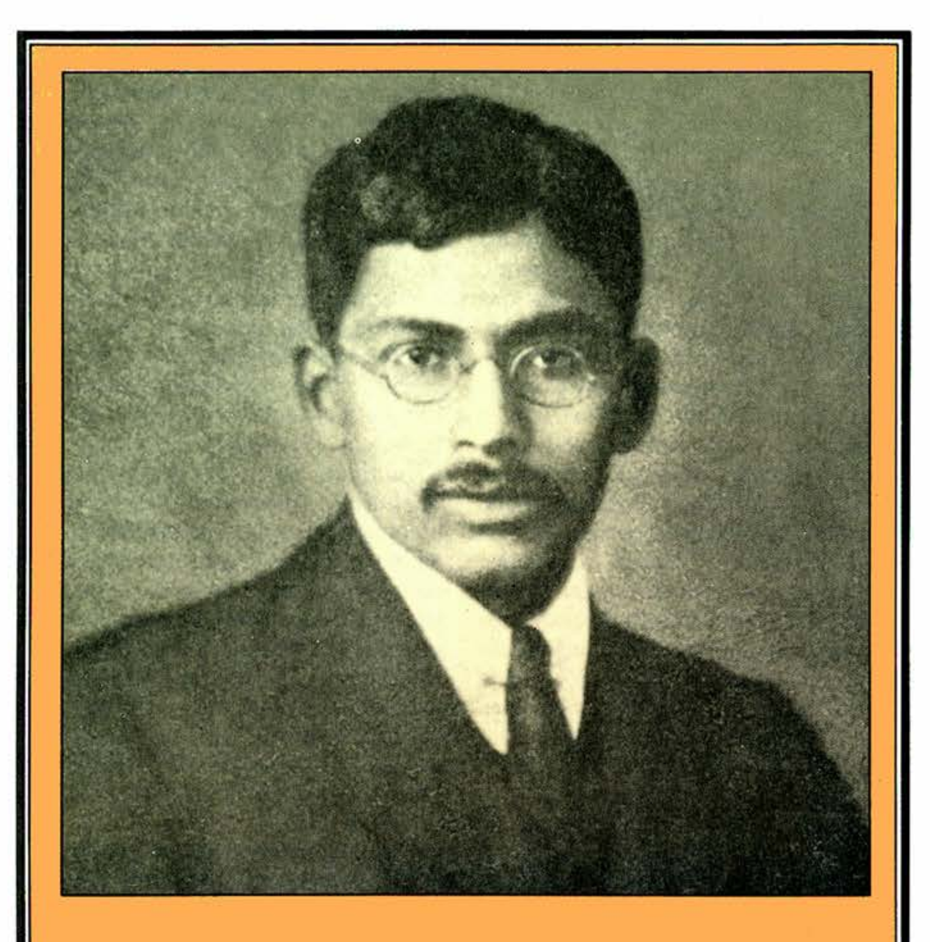
Por ejemplo, en las atmósferas estelares muy inferiores a los 4000 grados Kelvin, la mayoría de los átomos de hidrógeno mantienen sus electrones en el nivel de energía menor. (Las estrellas de este tipo se dividen en las clases *K* y *M* de la conocida serie de Harvard *O*, *B*, *A*, *F*, *G*, *K*, *M*, en la que las estrellas *O* son las más azules y las *M*, las más rojas.) Los fotones no pueden promover transiciones entre niveles mayores y ser absorbidos durante el proceso. Por consiguiente, no se dan las condiciones de absorción correspondientes a las transiciones entre los niveles mayores. A unos 10.000 grados Kelvin sí se producen transiciones entre los niveles mayores; las líneas de absorción (la "serie de Balmer") dominan el espectro visible. En las estrellas mucho más calientes (clase *A*), se ioniza la mayor parte del hidrógeno —o se mantiene en altos estados de excitación— y cualquiera de las transiciones se encuentra por encima de las frecuencias visuales; aquí, las condiciones de la absorción del hidrógeno se debilitan de nuevo. La mayor presión tiende a reducir el grado de ionización, y así la presión estelar influye también en las condiciones de absorción y emisión.

Después del trabajo de octubre sobre los espectros estelares, Saha publicó inmediatamente dos más mientras se hallaba aún en Calcuta. Viajó a Inglaterra, con el propósito de instalarse en Cambridge, pero sólo Alfred Fowler, del Colegio Imperial de Ciencia y Tecnología de Londres, le ofreció su ayuda. Apareció un cuarto trabajo después de incorporarse al laboratorio de Fowler. En dicho estudio se establecía, según quedó expuesto antes, que la clasificación *O*, *B*, *A*, *F*, *G*, *K*, *M* no sólo representaba una secuencia de color del azul al rojo, sino que enunciaba, además, una secuencia de temperaturas absolutas, siendo *O* la más cálida y *M* la más fría.

Durante su estancia en Londres, se quejaba de la falta de datos de laboratorio para poder orientarse. Russell se lamentaba también de la penuria de datos fiables, espectroscópicos y de ionización. A diferencia de Saha, sin embargo, sabía dónde obtenerlos: con George Ellery Hale y sus colaboradores de monte Wilson.

Ya en su carta de diciembre a Adams, Russell había descubierto la manera de sacarle partido a los hallazgos del hindú. Adams llevaba mucho tiempo sospechando que las diferencias de presión de las atmósferas estelares podían influir en la morfología de sus espectros. Su propio método de paralajes espectroscópicas, que había desarrollado con Anton Kohlshutter y en el que ciertas características espectrales podían servir de indicadores de distancia, ostentaban el papel de la presión en los espectros estelares; ahora la teoría de Saha proporcionaba una base teórica firme a estas hipótesis. Russell los puso de relieve, al tiempo que señalaba a Adams fuera a su propio y rico archivo de espectros estelares de monte Wilson, en busca de hidrógeno molecular en las estrellas muy frías.

Llegado el verano, Russell se personó en monte Wilson, en condición de adjunto de investigación durante el estío, para aplicar la teoría de Saha a las estrellas. Durante las dos décadas siguientes Russell salió de Princeton, al menos una vez al año, a veces dos, ha-



MEGHNAD N. SAHA, quinto hijo de un tendero, nació en la actual Bangladesh en 1893. Dotado de especial talento para las disciplinas que había elegido, matemáticas y física, poseía, sin embargo, una personalidad conflictiva que le hacía mostrarse agresivo y vehemente en el trato con sus superiores. Se doctoró en ciencias por la Universidad de Calcuta y no tardó en abordar los problemas astrofísicos, sacándole partido a lo que había aprendido dando clases de termodinámica y mecánica cuántica. En sus trabajos, escritos en Calcuta e Inglaterra entre 1919 y 1921, aplicó el concepto de ionización térmica a las atmósferas estelares y preparó el terreno para el conocimiento de los espectros estelares; sus estudios son considerados, por algunos, punto de partida de la astrofísica moderna.

A pesar de la importancia de su trabajo, Saha no fue invitado por sus colegas europeos y norteamericanos a colaborar con ellos para perfeccionar y ampliar la teoría. Regresó a la India, a la Universidad de Calcuta, pero poco después fue nombrado profesor de física en Allahabad. Durante las dos décadas siguientes, se convirtió en la figura central del Instituto Nacional de Ciencias de la India, la Sociedad Física India y la Organización India de Noticias Científicas. Tras volver a la Universidad de Calcuta en 1938, fundó un instituto para el estudio de la física nuclear y abogó por la necesidad de crear un programa nacional fundado en las posibilidades científicas. Aconsejó en materias muy dispares, desde el control de las inundaciones y la planificación económica hasta la reforma del calendario indio y los usos de la energía nuclear para fines pacíficos. En 1951 fue elegido miembro del Parlamento indio en calidad de independiente, cargo político que mantuvo hasta su muerte ocurrida en 1956.

cia las oficinas de Pasadena del Observatorio de monte Wilson. De camino, solía hacer un alto en otros observatorios para sugerir alguna idea, asaltar las bóvedas de placas para obtener datos y dar conferencias sobre múltiples temas. Aunque seguían interesándole sus viejas cuestiones de investigación, como las estrellas binarias y las variables, se propuso un nuevo objetivo: formular una teoría de los espectros estelares. Durante su primer verano en monte Wilson, afirmó ante un público procedente de Berkeley que, con la teoría de Saha, "la astronomía, la física y la química cuentan ahora con un modelo atómico de la emisión y absorción de la radiación".

Russell había utilizado también el archivo de imágenes espectroscópicas solares de monte Wilson para demostrar que algunas de las predicciones de Saha eran correctas y que la teoría, en su conjunto, podía explicar el comportamiento de los elementos de la atmósfera solar. Y añadió: "esto no es más que una mera ilustración de las inmensas posibilidades del nuevo campo de investigación que se abre ante nosotros. Queda mucho trabajo por hacer antes incluso de abordar el tema, y, mucho más, antes de desarrollarlo; astrónomos, físicos y químicos deben unirse en el ataque... No es caer en la utopía esperar que, de aquí a pocos años, la ciencia posea una teoría racional de los espectros estelares, así como un amplio conocimiento complementario sobre la constitución de los átomos".

No fue el único en atisbar esas posibilidades. Saha pidió el apoyo necesario para continuar su trabajo, y escribió a Hale para solicitarle las mismas cosas que se le habían concedido a Russell. Al mismo tiempo, Ralph H. Fowler y Arthur Milne reconocían, en Inglaterra, el potencial de lo que el hindú había hecho y trabajaron los años que siguieron para completar esta teoría. Observaron que la fórmula de Saha para describir las clases de espectros de Harvard, como secuencia de temperaturas absolutas, no explicaba adecuadamente el hecho de que hubiera más de un elemento en la atmósfera estelar, y rectificaron esta omisión. Al mismo tiempo perfeccionaron el papel que la presión desempeñaba.

Bastantes más fundaron su propio trabajo en el de Saha. Pero fue en monte Wilson, bajo la coordinación de Russell y de los colaboradores de Hale, donde se acometió una investigación exhaustiva de los espectros. Como concesión a Hale, Russell contestó la carta

de Saha, esbozando en ella el plan de trabajo que debería desarrollarse en monte Wilson. Le aseguró a Saha que iban a someterse a su dirección. Sin embargo, éste no fue invitado a formar parte del grupo.

Poco después de verificar las predicciones de Saha, Russell tomó la dirección que seguían Fowler y Milne para perfeccionar la teoría, en parte para explicar las anomalías espectroscópicas de las que la versión original de Saha no había dado cuenta. Había dos problemas que empezar a resolver: el imprevisto comportamiento del bario y la persistencia de hidrógeno en los espectros de todas las estrellas.

Russell descubrió que, en el espectro solar, el bario se hallaba más ionizado que el sodio, fenómeno extraño, ya que los dos elementos tienen el mismo potencial de ionización. El problema del bario le indujo a sumergirse en la teoría física para clasificar los espectros de los elementos terrestres alcalinos, entre los que se encuentra el bario.

Las tierras alcalinas se caracterizan por sus dos electrones de valencia, o exteriores, en vez de uno. Junto con F. A. Saunders, Russell elaboró un modelo perfeccionado de la estructura de los átomos en el que dos electrones participaban en la generación de líneas espectrales. Las reglas para la interacción de dos electrones que Russell formuló, en el transcurso de dicha colaboración, recibe hoy el nombre de acoplamiento Russell-Saunders; gracias al mismo, se explicaron los espectros del bario y las tierras alcalinas. Russell dio el siguiente paso antes incluso de completar ese último trabajo; nos referimos al examen de los espectros de los átomos que tenían tres electrones de valencia. Escogió el titanio y halló una norma más de transición. No cabía en sí de gozo: su física revelaba el funcionamiento de las estrellas y se comprobaba que los espectros estelares podían convertirse en instrumento para explicar los misterios del átomo.

Si bien el bario y el titanio fueron grandes logros, el hidrógeno seguía siendo una espina para Russell. En aquella época, los astrónomos creían que ningún elemento dominaba en las atmósferas estelares; admitíase que éstas eran mezclas gaseosas por lo general de elementos pesados, sobre todo de hierro. Además, la teoría de Eddington sobre la estructura estelar requería que el peso molecular medio del gas superase, de lejos, el del hidrógeno. Pero el hidrógeno persistía en casi todos los espectros estelares.

El problema del hidrógeno llevó a Russell y a los astrónomos de monte Wilson a recalibrar las longitudes de onda espectrales del Sol y los modelos del laboratorio. En Princeton, Russell y su infatigable ayudante Charlotte E. Moore cotejaron las intensidades de las características espectrales del Sol con una nueva teoría, desarrollada por Russell y otros, que determinaba las diversas intensidades lineales en función de las concentraciones relativas de los elementos en la atmósfera solar.

Sin embargo, la cuestión del hidrógeno seguía abierta. A pesar de las pruebas espectroscópicas, Russell se mostraba escéptico ante la teoría según la cual el hidrógeno dominaba todas las atmósferas estelares. Mientras andaba sumido en el asunto del hidrógeno, envió a Menzel a Harvard para que aprovechara su incomparable bóveda de placas de espectros estelares. Por entonces, una joven astrónoma, Cecilia Payne, acababa de llegar de Cambridge —donde estaba Eddington—, forjada en las ideas de Fowler y Milne. También a ella le interesaba explorar la estructura atómica con la ayuda de los espectros de Harvard y determinar, mejor de lo que había conseguido Saha, los elementos presentes en las estrellas. Payne dio cumplimiento a todo ello en su monumental tesis doctoral de 1925; se convirtió así en la primera persona que reconoció que el hidrógeno era, con mucho, el elemento más abundante en la atmósfera de las estrellas.

No era fácil aceptar su conclusión. Ponía en aprietos la teoría eddingtoniana de la estructura estelar, lo que impulsó a Russell a sugerirle a Payne que su resultado era a todas luces imposible. Esta siguió, sumisa, la dirección de Russell en su publicación de la tesis, pero en privado se aferró a sus conclusiones.

El asunto de la concentración de hidrógeno surgía una y otra vez y mellaba los esfuerzos de Russell por negarlo el año 1928, cuando ya muchos colegas empezaban a creer que Payne andaba en lo cierto. Russell formó a todas sus tropas de Princeton y monte Wilson y se lanzó al ataque del hidrógeno. Finalmente, en un trabajo magistral de 1929, al que se refirió como a su "reconocimiento de nuevo territorio", reunió cuantos datos espectroscópicos que él y Moore habían recogido y declaró que las atmósferas estelares constaban, en definitiva, principalmente de hidrógeno.

Durante su asalto postrero al hidrógeno, Russell sabía que Albrecht Un-

söld —alumno del físico teórico Arnold Sommerfeld y familiarizado con las formas modernas de la teoría cuántica— conocía cómo extraer información, relativa a la abundancia absoluta, de los perfiles lineales espectroscópicos, algo que Russell jamás había intentado hacer. Unsöld confirmaba también que las atmósferas estelares se componían, principalmente, de hidrógeno, y Russell sabía que las técnicas del joven alemán eran muchísimo más poderosas que las suyas.

El dominio que Unsöld tenía de la nueva física cuántica anunciaba el futuro de los estudios sobre las atmósferas estelares. El y otros europeos acabarían por perfeccionar el primer cálculo aproximado de Russell de las abundancias relativas en la atmósfera solar. Russell estaba encantado con ese ensanchamiento de su trabajo, pero era manifiesto que la nueva "mecánica cuántica" iba imponiéndose rápidamente. A mediados de la década de 1920, cuando Russell trabajaba todavía en busca de una teoría de los espectros multipletes (espectros producidos por niveles de energía atómica muy agrupados), Sommerfeld, H. Hönel y R. de L. Kronig estaban sobre la pista; la verdad es que le ganaron en rapidez a la hora de la publicación.

Esa competencia teórica le obligó a tomar en consideración al ejército de físicos europeos que atacaban entonces la estructura atómica. Sabía que le aventajaban en número y que le estaban dejando muy rezagado. En parte, ello se debía a la aversión que le producía la dirección que la física estaba tomando. Nunca se sintió a gusto con el complejo formalismo matemático de la mecánica cuántica y se movía con mayor holgura con lo que llamaba el modelo astronómico del átomo de Bohr, hasta su metáfora del "espín". Mucho más tarde, Russell denominaba todavía el principio de incertidumbre de Heisenberg un "principio de mensurabilidad limitada", siguiendo a Max Born. Tampoco le llenaba la dualidad de partícula de onda de la materia, aunque estaba dispuesto a aplicar cualquiera de esos dos modelos a los "problemas prácticos".

Mediada la década de 1920, prefirió dejar en manos de otros los desarrollos teóricos. Seguía admirando el poder y la generalidad del modelo de Bohr, así como la capacidad de éste para proporcionar normas de cálculo de los espectros atómicos. Con otros físicos espectroscopistas, se limitó a la resolución de aporías: aplicar el modelo de Bohr a los espectros para desenmarañar la estructura atómica.

Su papel pionero de la astrofísica cuantitativa fue el de un guía que mostraba el camino a seguir. Fue una figura de cambio que jamás llegó a realizar completamente solo esa transición; sus discípulos sí. Buena parte de la perdurable influencia de Russell debióse a ellos, astrónomos como Spitzer y Menzel, y a quienes éstos, a su vez, adiestraron.

Las múltiples misiones desempeñadas por Russell impulsaron a Shapley a concederle el título de "decano de los astrónomos norteamericanos". Confluía en él una insólita mezcla de dos estilos científicos clásicos: el del erizo y el del zorro, lo profundo frente a lo extenso. Conforme con la necesidad de la observación programática, repudiaba sin embargo los proyectos ambiciosos que no se apoyaban en una base teórica. La vista de Russell penetraba a menudo a través de la niebla para sugerir fructíferas líneas de investigación que otros podrían llevar a cabo. Según comentara Cecilia Payne-Gaposchkin en cierta ocasión, a una edad ya avanzada, "Henry Norris Russell reconocía cuándo una cosa valía la pena al primer golpe de vista". Aprovechándose de esas "cosas que valían la pena", y transmitiendo a otros la necesidad de una investigación sistemática a largo plazo e informada por la teoría física, Russell ejerció amplia influencia.

En un estudio sobre la profesión en 1946, Russell aparecía la mayoría de veces como un profesor incitador. Las citas de su trabajo tenían todavía un promedio de 50 por año en las décadas de 1960 y 1970, mucho después de su muerte, a los 79 años en 1957.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

THE HISTORY OF ASTRONOMICAL SPECTROSCOPY. Donald H. Menzel en *Annals of the New York Academy of Sciences*, vol. 198, págs. 225-244; 1972.

ASTRONOMERS TAKE UP THE STELLAR ENERGY PROBLEM. Karl Hufbauer en *Historical Studies in the Physical Sciences*, vol. 11, 2.ª parte, págs. 277-303; marzo de 1981.

QUANTUM PHYSICS AND THE STARS. David H. DeVorkin y Ralph Kenat en *Journal for the History of Astronomy*, vol. 14, n.º 40, 2.ª parte, págs. 102-132; junio de 1983 y vol. 14, n.º 41, 3.ª parte, págs. 180-222; octubre de 1983.

STELLAR EVOLUTION AND THE ORIGINS OF THE HERTZSPRUNG-RUSSELL DIAGRAM IN EARLY ASTROPHYSICS. David H. DeVorkin en *Astrophysics and Twentieth-Century Astronomy to 1950, editado por Owen Gingerich*. Cambridge University Press, 1984.

Taller y laboratorio

Cómo despreocuparse de las vibraciones y conseguir hologramas visibles en luz blanca

Jearl Walker

Llámase holograma cierto tipo de fotografía que, a diferencia de las normales, crea una ilusión de profundidad y, además, permite que el observador contemple la imagen de un objeto desde distintas perspectivas. La imagen parece tan real como el propio objeto. Existen diversos procedimientos para obtener hologramas, pero todos ellos pasan por exponer durante varios segundos una película a la luz láser que se refleja en el objeto. Muchos de estos procedimientos son extraordinariamente sensibles a las vibraciones durante la prolongada exposición, motivo por el cual los holografistas deben muchas veces recurrir a longitudes muy largas para afianzar sus aparatos.

Roland M. Bagby, de la Universidad de Tennessee, y Laurie Wright, del Hospital Odontológico Eastman de Londres, me han remitido un informe acerca de cómo obtener hologramas sin que salgan borrosos. La instalación la proyectaron Wright y Brian Keane, del Real Hospital del condado de Sussex; Bagby la modificó después. Se basa en una técnica de obtención de hologramas ideada en 1962 por el soviético Yuri N. Denisyuk. El aparato, robusto y de escasas proporciones, puede cargarse en el maletero del automóvil, transportarse a clase e instalarse sobre una mesa donde realizar los hologramas deseados. Además, los hologramas pueden observarse tanto con luz blanca procedente de una lámpara de incandescencia, como con la luz producida por un láser.

Para entender la técnica de Denisyuk hay que conocer antes los principios básicos de la holografía. La ilusión de profundidad y la exacta representación en perspectiva derivan de la misma naturaleza del holograma: un registro de la figura de interferencia que producen dos haces de luz durante la exposición. Uno de los haces se refleja en el objeto, el llamado haz objeto, cosa que no ocurre con el otro, el haz de referencia.

Los haces deben proceder de la misma fuente (un láser, hoy en día) para que lleguen a la película con una diferencia de fase fija entre ellos. La fase define el estado de cada onda luminosa al pasar por un punto determinado. Cuando atraviesa una "cresta", la onda se encuentra en cierta fase, opuesta a la fase que corresponde a los "vientres". Si por ese punto pasan dos ondas de la misma longitud de onda, la diferencia de fase nos indica en qué cuantía sus estados coinciden: las ondas están completamente en fase si se encuentran en el mismo estado; completamente defasadas, o en oposición de fase, si sus estados son opuestos.

Cuando coinciden las fases de las ondas, se dice que se interfieren constructivamente; el punto aparece entonces intensamente iluminado, pues se emparejan las crestas con las crestas y los senos o vientres con los vientres. Cuando las ondas se hallan en oposición de fase, se interfieren destructivamente; el punto aparece oscuro por culpa de esa total discordancia. Si las ondas son largas y continuas, su diferencia de fase permanece constante, mientras van pasando por el punto; lo mismo ocurre con el nivel de iluminación. No importa la dirección en que viajen los haces; pueden moverse en la misma dirección y sentido, en sentido contrario o formando un ángulo.

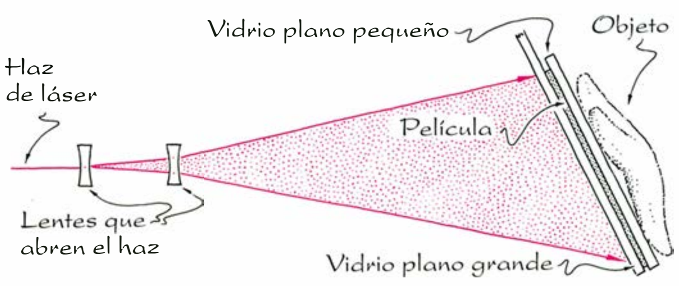
El holograma queda plasmado en un trozo de película, en cuya emulsión se registra una figura de interferencia. Como los haces proceden de la misma fuente, salen de ella completamente en fase; ahora bien, debido a que el haz objeto sufre una dispersión, llegarán a la emulsión con un amplio abanico de diferencias de fase. En unos puntos de la emulsión, la intensidad luminosa activa los granos de plata; en otros, los deja inalterados. Cuando se revela la película, los granos alterados quedan opacos, mientras que los inalterados se nos muestran transparentes. La película, ya convertida en holograma, aparece llena de líneas finísimas, unas oscuras y otras transparentes, que constituyen el registro de la figura de interferencia original. En algunos procesos, incluida la técnica de Denisyuk, la película se destiñe para que su brillo resalte. En tal caso, todas las líneas son transparentes, pero con índices de refracción diferentes, y así siguen conteniendo un registro de la figura.

Si el holograma se ilumina con un haz igual que el de referencia, la luz se difunde en el conjunto de líneas y reconstruye el haz objeto. Cuando miremos el holograma desde el ángulo adecuado e interceptemos parte de la luz difundida, percibiremos una imagen del objeto. Cuando desplacemos un poco la visual, interceptaremos una porción diferente de la luz difundida y captaremos una perspectiva distinta del objeto.

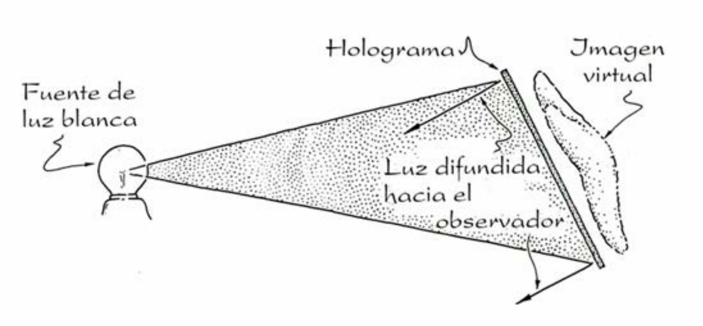
Los hologramas primitivos se hacían sin el concurso del láser. Proporcionaban unas imágenes borrosas y oscuras. Las imágenes holográficas actuales son más luminosas y nítidas gracias al empleo del láser, la mejor calidad de las películas y un método óptimo de revelado. El procedimiento habitual consiste en dividir en dos un haz de láser mediante un espejo semiplateado; esos dos haces se reflejan luego sucesivamente en otros espejos, hasta que llegan a la película. En algún punto de su trayectoria, uno de los haces incide en el objeto y, al reflejarse, se convierte en el haz objeto. El otro, el haz de referencia, es enviado a la misma cara de la película que el haz objeto, pero siguiendo un camino distinto.

Cuando se confeccionan hologramas de acuerdo con este procedimiento, hay que aislar el montaje de las vibraciones, de suerte que la figura de interferencia no aparezca degradada en la película, habida cuenta de la prolongada exposición. Si cualquier cosa que hubiere en el trayecto de uno u otro haz recibiera un golpe, cambiaría la diferencia de fase entre las ondas que llegan a cada punto y se emborronaría la impresión de la figura de interferencia.

Esta técnica suele presentar otro in-



1. Dispositivo para obtener hologramas por el método de Denisyuk



2. Observación de un holograma con luz blanca

conveniente: los hologramas deben verse con el mismo tipo de luz a la que se expuso la película. Este requisito excluye su contemplación con la luz blanca de una bombilla, ya que la luz blanca se compone de un sinnúmero de longitudes de onda. La difusión que sufren las ondas en un holograma depende de la longitud de onda; si ésas son muy diferentes, interceptaremos un conjunto de figuras de difusión que producirá tal maraña de imágenes que no podremos reconocer nada.

Un procedimiento para salvar la dificultad consiste en exponer la película de tal modo que el holograma creado produzca la imagen seleccionando una sola longitud de onda. En esta técnica, los haces objeto y de referencia se envían sobre caras distintas de la película; la emulsión de ésta es gruesa, y en todo su espesor se forman numerosas capas de interferencias constructiva y destructiva, separadas media longitud de onda. La información acerca del objeto permanece en las variaciones laterales de la figura de interferencia, en este caso, sin embargo, queda registrada la longitud de onda en el espaciado de las capas.

Tras revelar la película, se ilumina con un haz de luz blanca que prosigue el mismo trayecto que antes había tomado el haz de referencia; la miramos desde el lado correspondiente a la fuente luminosa. Pese a la infinidad de longitudes de onda que inciden en el holograma, la única luz que se difunde en nuestra dirección es aquella cuya longitud de onda coincide con la del haz de referencia original. Esta difusión selectiva es resultado de la separación de media longitud de onda que existe entre capas consecutivas: el dispositivo refleja intensamente la luz de la longitud de onda "correcta", pero no la luz de cualquier otra longitud de onda.

La difusión puede considerarse una forma de reflexión; de ahí que a este tipo de holograma se le llame holograma de reflexión. Cuando interceptamos parte de la luz difundida, percibimos una imagen situada en la cara opuesta del holograma. Esta imagen es una imagen "virtual" que construye nuestro sistema visual, extrapolando hacia atrás, hacia su origen aparente, los rayos que reciben nuestros ojos. Si colocamos una cartulina en la posición aparente de la imagen y miramos directamente esa cartulina en vez de hacerlo a través del holograma, no veremos la imagen.

Un holograma de Denisyuk es un holograma de reflexión. Ahora bien, en este caso la luz láser no se divide en dos haces mediante un espejo semiplateado. La técnica empleada consiste en ensanchar el haz de láser mediante una o dos lentes y luego enviarlo directamente hacia el objeto, atravesando antes una película transparente inclinada y colocada delante mismo del objeto. Parte de la luz, que actúa de haz objeto, se refleja hacia la película e interfiere con la luz entrante que actúa como haz de referencia. Cuando se revela la película, el holograma puede verse iluminándola con una luz blanca que siga el mismo trayecto inclinado que antes había seguido el haz de láser inicial. Adviértase, dicho sea de paso, la ventaja de que la película esté inclinada durante la exposición. Si el haz de láser se hubiera colocado perpendicular a la película, para ver el holograma tendríamos que mantener la fuente de luz blanca delante del rostro, y no desplazada a un lado.

La técnica de Denisyuk resulta muy práctica merced al escaso aislamiento de las vibraciones que el aparato precisa. El objeto y la película están próximos entre sí; si uno se agita, el otro se mueve casi al unísono, de modo que la figura de interferencia registrada en la película apenas si se resiente. Si alejamos más el objeto, de la película, desaparece esta ventaja y habrá que aislar el montaje de las vibraciones.

El lector puede obtener sus propios hologramas con la técnica de Denisyuk construyéndose el montaje ideado por Wright y Keane que se muestra en la figura 3. En la 4 se presenta la lista de piezas que lo componen. El tamaño y diseño exactos de las piezas no son absolutamente obligatorios; Bagby y Wright sugieren que acaso a los lectores pueda agradarles improvisar.

El armazón del aparato se construye con los tubos, los empalmes y los insertos que los conectan. Para las junturas se empleará un mazo de plástico o de goma, pero sin golpear fuertemente las piezas. Para comprobar la estabilidad y rigidez del conjunto del armazón, se coloca sobre el tablero de contrachapado; si se bamboleara, se ajustarán los empalmes hasta que quede estable y rígido, ajustándose entonces al contrachapado mediante las presillas Z y tornillos.

El soporte en U se construye con tres trozos de tubo cortos. (Debe comprobarse que el soporte encaje en uno de los extremos del armazón con un huelgo de unos 3 milímetros a cada lado.) A la parte inferior del soporte se fija, por fuera y con pernos, un trozo de tubo de la misma longitud. Estos pernos han de atravesar los canalillos que se perforarán en ambas piezas y se fijarán atornillándolos a los canalillos o bien con tuercas. Este trozo de tubo adicional forma un estante estrecho donde colocar lo que se haya de fotografiar.

Se determinan y marcan los puntos de equilibrio indiferente del soporte en U y luego se coloca éste en posición vertical en el extremo del armazón y a unos 20 milímetros por encima del tubo inferior del mismo. En los tubos verticales del armazón se marcan las posiciones de los puntos de equilibrio indiferente del soporte, se retira éste y se taladran luego en el armazón unos orificios de 6 milímetros en los puntos marcados. Asimismo, en los puntos de equilibrio indiferente del soporte se abren otros agujeros con rosca. El soporte vuelve a colocarse en el extremo del armazón, se pasan sendos tornillos por los orificios de éste, intercalando arandelas para separarlo del soporte; luego, se atornillan los pernos en los orificios con rosca de este último. De-

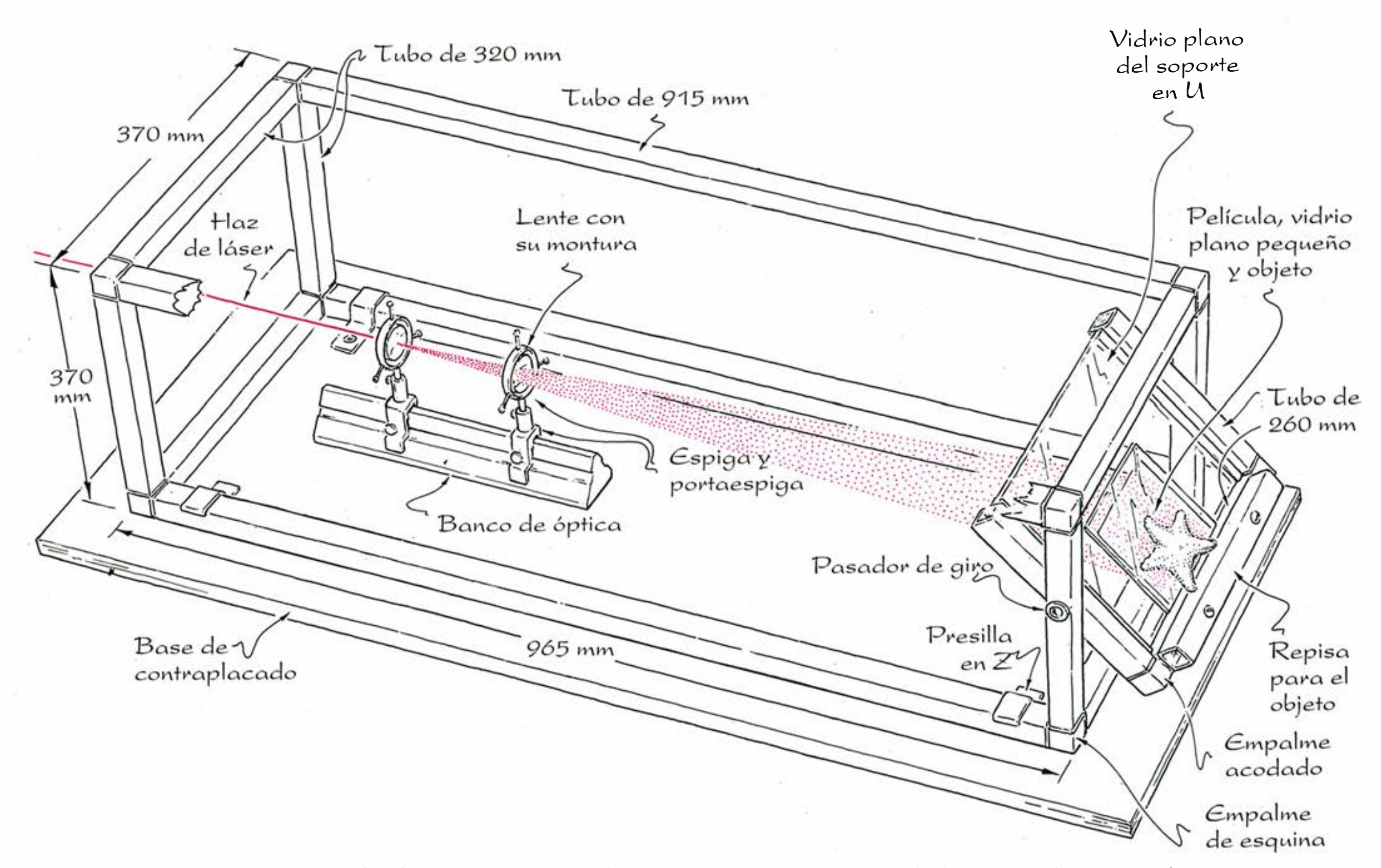
berán ponerse arandelas en número suficiente para que el soporte gire sin dificultad en torno a los pernos, pero de modo que no baile, una vez montado, con el rozamiento en las arandelas. Seguidamente, se instala la canaleta (o riel cauchutado del tipo de los que sujetan las hojas de vidrio en algunas ventanas), comprimiéndola contra la cara interna del soporte en U y se introduce en ella una placa de vidrio. Sobre el vidrio descansará más tarde la película. (Quizás el lector pueda simplificar el conjunto del aparato. Wright ha construido uno de madera.)

El banco de óptica deberá medir de treinta a sesenta centímetros de longitud, lo que puede hacer necesario recortar un banco de tipo corriente. Hay que montar dos portaespigas que sujeten las espigas a las que van atornilladas las monturas de las lentes. Aquí podemos emplear espigas y monturas comerciales, o bien montar las lentes en unas abrazaderas caseras para escobas, atornillar éstas a clavijas de madera e introducir las clavijas en los portaespigas. (Para reducir aún más el coste del aparato puede emplearse también un banco de óptica casero.) Las lentes son planocóncavas o bicóncavas, de corta distancia focal (de 15 a 30 milímetros). Antes del ensamblaje final, hay que pintar el banco y todas las piezas que descansan en él, salvo las lentes, con una pintura negra mate que elimine la luz parásita durante las exposiciones.

Para instalar el aparato hay que hacerse con una mesa robusta. Las patas deben introducirse en botes de café parcialmente llenos de alguna sustancia amortiguadora, sirve arena fina, que amortigüe lo bastante las vibraciones. (Si posteriormente éstas plantearan dificultades, habrá que instalar la mesa sobre neumáticos inflados.) El banco y los instrumentos ópticos se colocan en el aparato, se recorta una hoja de papel blanco del tamaño de la película (de 10 × 12 centímetros, aproximadamente) y se coloca sobre el vidrio del soporte en U, el cual debe inclinarse acercando su borde superior a las lentes. Por último, hay que alinear las lentes con el centro del papel. Encender el láser y regular su altura, así como la altura y posición horizontal de las lentes, hasta que la luz quede uniformemente repartida sobre el papel. (No dirigir nunca la vista directamente hacia el láser, evitando también que a nuestros ojos llegue reflexión fuerte del mismo.) Cuando la alineación óptica sea aceptable, se aseguran banco y contrachapado, lo mismo que las posiciones de los portaespigas.

Bagby y Wright defienden que sirve cualquier láser de helio-neón. Los mejores son los que emiten luz polarizada a una potencia de salida de cinco miliwatt como mínimo. (Cuanto menor sea la potencia del láser, más largas tendrán que ser las exposiciones; ahora bien, las exposiciones largas pueden convertir las vibraciones en un auténtico problema.) Conviene que el grosor de la emulsión sea superior a seis micras, transparente a la luz por ambas caras (pídase una película sin capa antihalo) y sensible a la luz láser roja; por ejemplo, una película Agfa 8E75HD NAH, una película espectroscópica Kodak 649-F o una placa Kodak de alta resolución.

Para procesar la película necesitamos un virador y un revelador de grano fino y alto contraste sirve Kodak D-19. El revelador es reutilizable si se guarda en un lugar fresco dentro de una botella de plástico marrón u opaca. El virador se necesita para iluminar los hologramas; sin él, los hologramas de reflexión resultan decepcionantemente oscuros. Bagby y Wright me han enviado las recetas de dos posibles viradores. Preparan uno añadiendo 25 gramos de bromuro potásico y otro tanto de ferrocianuro potásico a unos 900 mililitros de agua (mejor si es destilada). Se agita hasta disolver totalmente los polvos, se añade agua hasta completar un volu-



3. Montaje ideado por Laurie Wright y Brian Keane para crear hologramas de Denisyuk

men de 1000 mililitros y luego se añaden con cuidado 10 mililitros de ácido sulfúrico concentrado. (Todo esto debe hacerse en un fregadero de cocina o un vertedero que no nos importe cómo quede, dejando correr el agua del grifo para que diluya el ácido que se vierta antes de que llegue a las cañerías. Además, siempre que se manipule una mezcla viradora hay que tomar la precaución de ponerse gafas protectoras y guantes de laboratorio.)

El otro virador proporciona hologramas más luminosos, aunque puede también desplazar los colores. (Corrimiento que no importa cuando el holograma se observa con luz blanca; pero, si miramos con la luz láser original, el desplazamiento puede empalidecer o eliminar la imagen.) Se prepara la mezcla añadiendo 30 gramos de bromuro potásico y otro tanto de sulfato férrico a 900 mililitros de agua, agitando y añadiendo agua hasta un volumen de 1000 mililitros.

Necesitaremos también un poco de metanol puro (al 100 por ciento), una luz protectora verde y un secador de pelo, preferentemente con mandos de calor y aire independientes. La luz protectora verde nos deja ver mientras revelamos la película. El metanol permite secar rápidamente los hologramas, pero debemos evitar su inhalación o acercarlo a una llama o chispa, ya que podrían inflamarlo. El secador de pelo sirve para el secado final.

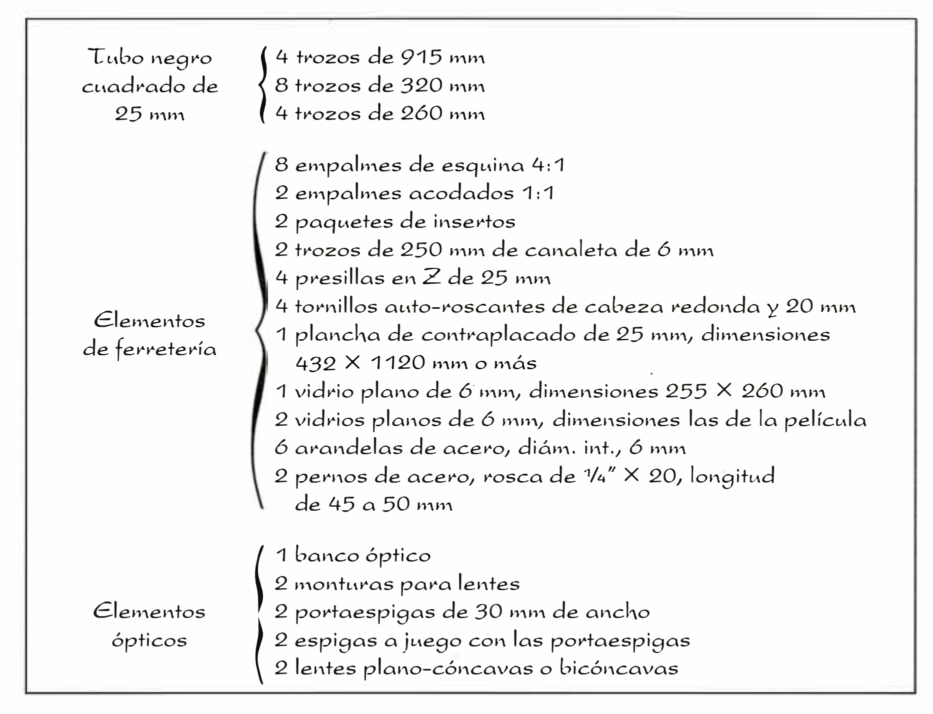
Bien, pues; ya estamos preparados para obtener un holograma de Denisyuk. Con las luces de la habitación apagadas y el láser encendido, volveremos a comprobar la alineación del haz colocando una hoja de papel blanco sobre el vidrio del soporte en U, que habremos inclinado entre 30 y 45 grados con respecto a la vertical. Sobre el papel colocaremos un vidrio plano de dimensiones un poco mayores que la película que vayamos a emplear. Fijaremos, sobre el vidrio grande, las posiciones de los bordes izquierdo y derecho de este segundo vidrio con cinta transparente; y luego extraeremos el papel.

Con un cartón se obstruye el paso de la luz láser. Se introduce entonces la película entre los dos vidrios, moviéndola de modo que encaje entre las cintas. La cara emulsionada debe quedar encarada al láser. Sobre la hoja de vidrio superior colocaremos el objeto a fotografiar y esperaremos varios minutos para que se amortigüen las vibraciones. Por último, elevaremos un poco el cartón y volveremos a esperar unos 30 segundos para que se amortigüen las nuevas vibraciones; y lo elevaremos entero para exponer la película.

La duración apropiada de la exposición depende de la película, la intensidad del haz de láser, el tamaño de la película y la reflectancia del objeto; por consiguiente, se necesita cierta experimentación. Si se emplea un láser de 5 miliwatt y una película de unos 10 × 12 centímetros y el objeto posee una reflectancia moderada, la exposición puede necesitar unos cinco segundos. Para terminar la exposición volveremos a colocar el cartón delante del láser. Retiraremos, a continuación, la película y la encerraremos en un recipiente hermético a la luz, hasta que podamos revelarla.

La operación de revelado hay que llevarla a cabo en una habitación iluminada sólo con luz protectora verde. Provistos de guantes de protección, introduciremos la película en el revelador, asegurándonos de que la cara emulsionada quede hacia arriba para que no se arañe en el fondo de la cubeta. Hay que ir agitando la película dentro del líquido hasta que quede suficientemente oscura, lo cual puede tardar entre 30 segundos y dos minutos; ésta es una operación que requiere cierta experiencia. Seguidamente, la película debe lavarse en agua corriente durante dos minutos, antes de introducirla en una de las mezclas viradoras. Si al introducirla no se vuelve más transparente, es que fue expuesta o revelada en exceso, o bien que el virador estaba ya pasado.

Si la película se aclara, la lavaremos nuevamente en agua corriente durante dos minutos. Si el agua del grifo fuese dura, habrá que enjuagarla en agua destilada para eliminar los depósitos. La secaremos con una toalla de papel suave para eliminar el agua que haya quedado adherida, aunque sin secarla del todo. Para completar el secado, se sumerge en metanol durante unos dos minutos. (Si pasa demasiada agua al baño de metanol, el holograma, una vez revelado, aparecerá oscuro.) Tras la inmersión, hay que actuar rápidamente: sacar la película del líquido, dejar que éste escurra y ponerla sobre una toalla seca de papel suave con la cara emulsionada hacia arriba. Colóquese suavemente otra toalla de papel sobre la cara emulsionada; el secado con el secador de pelo acelera el proceso, ajustando los mandos de éste para que dé aire caliente. (Si en el secador se generan chispas internas, lo mantendremos alejado del metanol.) Dispondremos ya de un holograma que podremos contemplar con luz blanca, con tal que la fuente luminosa sea pequeña: para ello puede servirnos una linterna o un proyector de diapositivas



Tubo negro cuadrado de 25 mm	4 trozos de 915 mm 8 trozos de 320 mm 4 trozos de 260 mm
Elementos de ferretería	8 empalmes de esquina 4:1 2 empalmes acodados 1:1 2 paquetes de insertos 2 trozos de 250 mm de canaleta de 6 mm 4 presillas en Z de 25 mm 4 tornillos auto-roscantes de cabeza redonda y 20 mm 1 plancha de contraplacado de 25 mm, dimensiones 432 × 1120 mm o más 1 vidrio plano de 6 mm, dimensiones 255 × 260 mm 2 vidrios planos de 6 mm, dimensiones las de la película 6 arandelas de acero, diám. int., 6 mm 2 pernos de acero, rosca de 1/4" × 20, longitud de 45 a 50 mm
Elementos ópticos	1 banco óptico 2 monturas para lentes 2 portaespigas de 30 mm de ancho 2 espigas a juego con las portaespigas 2 lentes plano-cóncavas o bicóncavas

4. Elementos necesarios para construir el montaje de Wright y Keane

sin su barril delantero, pero no un tubo fluorescente.

Si el objeto a fotografiar no pudiera colocarse bien en la repisa del soporte en U, lo pondremos junto con la película horizontalmente, sobre un trozo de vidrio apoyado en la parte superior del aparato. El vidrio debe tener un grosor de 25 milímetros y unas dimensiones de 30 × 35 centímetros. Para reflejar el haz de láser hacia arriba, en dirección al objeto, necesitaremos un espejo que mida 20 × 25 centímetros y con la cara reflectante colocada hacia adelante. El soporte en U se inclina de modo que su parte superior se aleje del láser; se coloca allí el espejo y se ajusta todo hasta que la luz láser se reparta uniformemente sobre una hoja de papel que habremos dejado en el vidrio horizontal. Y ahora viene el procedimiento de exposición descrito anteriormente.

El lector se preguntará por qué no se confeccionan todos los hologramas según el método de Denisyuk. Ocurre que, en los hologramas de Denisyuk, la ilusión de profundidad suele ser más débil que en los hologramas de haz dividido. La sensación de profundidad queda disminuida porque el láser no emite una onda única continua, sino una sucesión de ondas continuas, ninguna de ellas más larga que la longitud del propio láser. La fase cambia abruptamente y al azar cuando una onda sale del aparato y otra comienza a salir, con lo cual, para que la interferencia entre dos ondas se mantenga inalterada al exponer la película, los haces deben proceder de la misma onda. En el montaje de Denisyuk las ondas, esencialmente, se pliegan sobre sí mismas al difundirse de un punto a otro de un objeto. Si ese punto está próximo a la película, la porción reflejada de la onda puede interferir en la película con la porción incidente de la misma onda; pero si el punto está demasiado alejado, la porción reflejada se encuentra con la porción incidente de otra onda, con lo que la diferencia de fase es impredecible y la interferencia sufre altibajos durante el tiempo que se invierte en la exposición. Así es como los hologramas de Denisyuk captan cabalmente los puntos próximos de los objetos, pero no los puntos distantes.

Aunque el método de Denisyuk sea el más sencillo para hacer hologramas, ofrece todavía dificultades. Para consultas adicionales, el lector puede utilizar las referencias de la bibliografía de este número. Además, Bagby se ha brindado a contestar las consultas que se le dirijan al Departamento de Zoología, Universidad de Tennessee, Knoxville, Tenn. 37996-0810.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

HOMEGROWN HOLOGRAPHY. George Dowbenko. American Photographic Book Publishing Co., Inc., 1978.

LASERS AND HOLOGRAPHY: AN INTRODUCTION TO COHERENT OPTICS. Winston E. Kock. Dover Publications, Inc., 1981.

HANDBOOK OF HOLOGRAPHY: MAKING HOLOGRAMS THE EASY WAY. Fred Unterseher, Jeannene Hansen y Bob Schlesinger. Ross Books, 1982.

Juegos de ordenador

Evolución simulada: un programa en el que los microbios aprenden a cazar bacterias

A. K. Dewdney

"Quienes, como yo, no sean matemáticos, podrán encontrar en el ordenador un poderoso amigo de la imaginación."

—RICHARD DAWKINS,
El relojero ciego

Por el fondo legamoso de una charca de agua estancada se arrastran, de acá para allá, cierto número de protozoos; se nutren de las bacterias que lentamente van decantándose sobre ellos. Aunque todos los protozoos ofrecen el mismo aspecto, muestran en su conducta diferencias importantes. Algunos corren sin rumbo en busca de bacterias y, en consecuencia, comen poco. Otros se mueven con propósito más definido, siguiendo una pauta de búsqueda que casi se nos antoja metódica; encuentran éstos comida en abundancia. Todos los mundos microscópicos poseen fascinación propia, pero esta escena concreta reviste un interés especial, porque los protozoos metódicos evolucionan a partir de las cohortes erráticas en el intervalo de tan sólo una hora.

Como no pocos lectores habrán adivinado ya, la escena descrita no se observa a través del ocular del microscopio, sino sobre la pantalla de un ordenador. Está generada por un programa llamado Evolución Simulada, preparado por Michael Palmiter, un profesor de bachillerato de Temple City, California. Las diminutas y blancas criaturas protozoicas, que Palmiter llama microbios, van deambulando por la pantalla, engullendo bacterias purpúreas. Conforme van sucediéndose las generaciones de gérmenes, asistimos a la aparición y evolución de nuevas conductas de trofismo.

También Richard Dawkins, de la Universidad de Oxford, ha buscado comprender mejor la evolución, y ha investigado programas que tratan de remedar sus diferentes aspectos. Uno de tales programas, escrito por el propio Dawkins, fue tema de esta sección hace más de un año [véase INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, abril de 1988]. El programa de Dawkins nos mostraba biomorfos, siluetas generadas por ordenador que, a veces, nos recuerdan las siluetas de seres vivos. Los biomorfos evolucionan merced a un proceso de "selección artificial". El operador del ordenador elige a su arbitrio una de las nueve variantes de siluetas del biomorfo actual, que sirve de base para futuras generaciones de biomorfos.

Los biomorfos que emergen del programa de Dawkins pueden ser curiosos y divertidos —e incluso, a veces, parecerse a seres vivos—, pero no puede decirse que hayan evolucionado de manera natural, esto es, por mor de selección interna. No obstante, Dawkins opina que debería resultar posible la preparación de un programa de ordenador capaz de remedar la evolución natural. Las especies "informáticas" provistas de tal "evolutividad" podrían ser focos de radiación de formas cada vez más complejas, que la selección se encargaría de limitar a números manejables. Además, los descendientes que sobrevivieran habrían de ser capaces de evolucionar hacia formas nuevas, completamente inaccesibles a sus antepasados.

Los seres protozoicos de Palmiter representan un paso más hacia el objetivo de Dawkins. Como nos revela una ojeada a la figura 2, los microbios (los puntitos blancos) habitan en el seno de un rectángulo sobre el cual se están depositando sin cesar bacterias (los puntos de color púrpura). Los gérmenes desarrollan una vida dominada por el movimiento y el trofismo de bacterias. Cada vez que un microbio devora a una bacteria, ésta le proporciona 40 unidades energéticas, suficientes para realizar 40 movimientos. En los lugares ricos en alimento, el bichito puede adquirir en pocos minutos 1500 unidades energéticas. Y si eso ocurre, se activará un extraño mecanismo: el microbio no recibe ningún beneficio, por mucho que siga comiendo, en tanto que su nivel de energía no descienda por debajo de las 1500 unidades.

Por otra parte, puede suceder que, durante un período prolongado, el microbio encuentre muy poco que comer. Sus reservas energéticas irían entonces descendiendo gradualmente hasta cero; llegado a ese punto, el bichito parecería reposar perezosamente durante unos cuantos ciclos, como meditando acerca de lo cercano de su fin, y se extinguiría después como una lucecita.

El éxito que alcance el microbio en hallar alimento depende, claro está, de la abundancia relativa de bacterias de su entorno inmediato. Dado que las bacterias se depositan más o menos uniformemente por todo el interior del rectángulo, si la depredación localizada ha agotado las bacterias en cierto lugar, forzoso es que haya muchas más en otros puntos. Algunos microbios parecen capaces de llegar más prestamente que otros a las zonas de relativa abundancia. Todo depende de los movimientos que realice el protozoo; por así decirlo, de la regla de búsqueda a que obedezca.

Este esquema darwinista de Evolución Simulada, aunque abstracto, depende de "genes" que gobiernan la forma de moverse de los microbios. Es probable que no existan estos genes concretos en los protozoos reales, pero los microbios de Palmiter disponen de seis. Han sido denominados *AV*, *D*, *DT*, *AT*, *IT* e *I*, que corresponden a AVante, Derecha, Derecha Toda, ATrás, Izquierda Toda e Izquierda. (Las direcciones corresponden al punto de vista del microbio. Los giros ordinarios poseen una amplitud de 60 grados a derecha o izquierda, mientras que los giros fuertes la tienen de 120 grados.)

La dirección en que apunta el microbio en un instante dado se determina por sorteo: el programa extrae una de las seis direcciones posibles del bombo matemático. Si el programa elige *I*, por ejemplo, el microbio efectúa un giro de 60 grados a la izquierda. La probabilidad de que sea elegida una dirección concreta tiene asignado un valor de probabilidad, dado por el gen correspondiente. Por tanto: cuanto mayor el valor de un gen, más grande su contribución a la pauta general de movimiento del ser. Si —pongamos por caso— un microbio tiene un valor de *I* grande en comparación con los valores de los otros cinco genes, el bichito pasará buena parte del tiempo virando a la izquierda.

Cada una de las posibles combinaciones de valores de los genes tiene por efecto una pauta diferente de movimiento, y sea cual fuere su composición génica, con ella ha de apechugar toda su vida. Lo más que puede esperar (por ser un tanto antropomórfico) es que su descendencia se desenvuelva mejor.

Después de que uno de estos gérmenes ha efectuado 800 movimientos, alcanza la "madurez" y está en situación de reproducirse. Pero sólo lo hace si además es "vigoroso", es decir, si ha acumulado 1000 o más unidades de energía bajo su membrana de color blanco eléctrico. Los paramecios experimentan, al reproducirse, un proceso de conjugación, pero nuestros bichejos se reproducen por fisión: un microbio electrónico maduro y vigoroso se escinde en dos nuevos, dotados cada uno de la mitad de energía de su predecesor. En la reproducción, los gérmenes recién engendrados heredan los genes de movimiento del progenitor, aunque con una pequeña diferencia; a saber: en cada descendiente, el valor de uno de los genes queda ligeramente incrementado o decrementado.

Supongamos, por ejemplo, que un microbio maduro tenga los valores génicos $AV = 3$, $D = 2$, $DT = 0$, $AT = -2$, $IT = 0$ e $I = 1$. Sus dos descendientes, a quienes llamaremos X y Z, podrían heredar la siguiente composición:

X: $AD=4$ $D=2$ $DT=0$ $AT=-2$ $IT=0$ $I=1$
Z: $AD=3$ $D=2$ $DT=0$ $AT=-2$ $IT=-1$ $I=1$

Como podemos ver, el descendiente X ha incrementado en una unidad el valor de AD, mientras que el descendiente Z ha decrementado en una unidad el valor de IT.

¿En qué se diferenciarán los descendientes de su progenitor? El descendiente X mostrará una tendencia a avanzar ligeramente mayor que su progenitor, mientras que el Z tendrá una tendencia algo menor a virar fuertemente hacia la izquierda. Sobre la pantalla del ordenador, tales ligeros desplazamientos de tendencia apenas resultan perceptibles por avezado que sea el observador.

En su modalidad más simple, Evolución Simulada empieza por dotar a 10 microbios con una estructura génica aleatoria, lo que hace que la gran mayoría de ellos salten de un lado a otro de modo impredictible. Por lo general, tales microbios "saltarines" exhiben una tasa de mortalidad muy elevada. Propenden sencillamente a devorar casi toda la comida de su vecindario inmediato, acabando después por agotar su energía y morir de inanición en terreno baldío. A pesar de ello, algunos alcanzan a sobrevivir.

Las generaciones se suceden unas a otras con intervalos de un minuto, más o menos. Esta lucha a vida o muerte por la supervivencia resulta ya apasionante de observar, pero el dramatismo de la situación se acentúa notablemente pocos minutos después, cuando el observador cae en la cuenta de que algunos de los bichitos han comenzado a comportarse de manera diferente. No vibran ya erráticamente; avanzan tambaleándose. Al cabo de 20 o 25 minutos, podemos ver microbios deslizantes, aunque las distancias que recorran sean cortas. Tales microbios parecen desenvolverse mucho mejor que sus erráticos predecesores. De hecho, justo por esa razón, los vemos proliferar ante nuestros ojos.

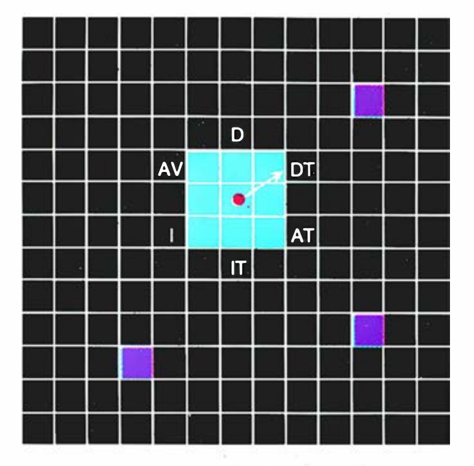
Llegado el momento aparecen microbios "crucero", que pasan gran parte de su tiempo avanzando, aunque también efectúen giros de vez en cuando. Ello conlleva que casi siempre estén desplazándose hacia poblaciones más densas de deliciosas bacterias púrpuras. En cuanto hay unos cuantos gérmenes que manifiestan semejante conducta, ésta llega a dominar la población entera, dado que los "cruceros" acaban recogiendo la parte del león de la cosecha bacteriana.

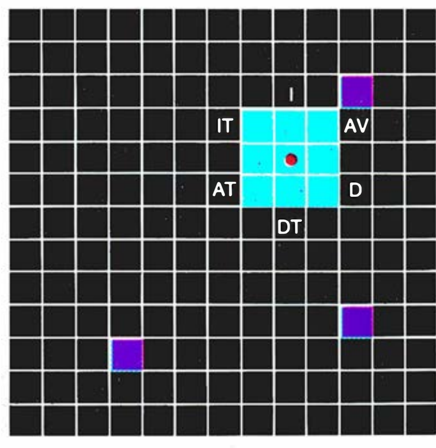
Aunque los "cruceros" constituyen una especie selecta, sigue habiendo, no obstante, cierta variación en la población de "cruceros". Algunos de ellos, por ejemplo, giran hacia la derecha con frecuencia mayor que hacia la izquierda, mientras otros manifiestan la tendencia inversa. Como es obvio, se producen retrocesos ocasionales. Algunos cruceron engendran descendientes mal adaptados. Una enfermedad corriente, genéticamente transmitida, es la vulgarmente llamada "girillo"; el microbio que la contrae vira con demasiada frecuencia hacia un mismo lado. Estas infortunadas criaturas suelen morir sin haber conocido el goce de la fisión.

Ya resulta suficientemente interesante ver emerger la especie de los microbios "crucero", pero el programa de Palmiter aún ofrece más. ¿Qué sucede si se producen variaciones en el ambiente? ¿Llegará a evolucionar más de una especie? Para responder a tal pregunta, se hace funcionar la Evolución Simulada en otra modalidad, en la que la pantalla sigue ofreciendo un aspecto muy similar, excepto por un parche anómalamente rico en bacterias ubicado en el ángulo inferior izquierdo. Las bacterias de ese manchón se reponen a un ritmo mucho más elevado que el normal [*véase la figura 3*]. Palmiter llama Jardín del Edén a esa región feraz.

Con el ir y venir de las generaciones, los "cruceros" evolucionan como antes. Pero en el seno del Jardín del Edén ocurre algo completamente diferente. Unos cuantos microbios saltarines que han tenido la fortuna de colarse en el banquete bacteriano reciben presta recompensa por carecer de método de trofismo organizado. Salten y vibren como quieran, la comida continúa rodeándoles.

No obstante, cuando la comida comienza a escasear en el Jardín del Edén, actúa una sutil presión ambiental. Las estrategias de vibración y salto aleatorio dejan pronto de ser viables. Es entonces cuando hacen acto de presencia los "viradores". Lo que normalmente constituía un defecto genético





1. Los giros del microbio se refieren a su dirección actual

desastroso pasa a ser en realidad una ventaja en el Jardín del Edén. De hecho, en el transcurso del tiempo, acaban por predominar en el paraíso aquellos microbios con fuerte tendencia a girar en una misma dirección. La razón es evidente: un bichito que propenda a girar frecuentemente hacia un mismo lado hacia la derecha, por ejemplo, tenderá a permanecer más tiempo dentro del jardín que sus antepasados saltarines.

Transcurridas a lo más unas cuantas horas, el Jardín del Edén queda poblado exclusivamente por viradores altamente especializados, a los que podríamos llamar, con toda propiedad, "orbitadores" nerviosos. Siguen durante muchos ciclos una órbita específica y, después, súbitamente, se desplazan un cuadrado y repiten la órbita, barriendo bacterias en cada pasada.

¿Podríamos considerar a la Evolución Simulada como modelo válido de la evolución biológica? Tan sólo en un sentido muy restringido. Pone de manifiesto de qué forma puede un ambiente favorecer ciertas variaciones de la descendencia que conducen, en último término, a la formación de especies nuevas. Pero a eso es a lo más que pueden llegar las analogías. En cuanto consiguen emerger una o dos especies estables de microbios, nada más sucede. ¿Qué haría falta para hacer realidad el sueño de Dawkins de una evolución indefinidamente prolongada, generada por ordenador? Tal vez nada menos que un universo en miniatura en el seno de la máquina.

Los lectores interesados en estudiar el tema pueden encargar un ejemplar de Simulated Evolution a Life Science Associates. Life Science Associates es una pequeña compañía dedicada a la creación de programas educativos; su dirección es 1 Fenimore Road, Bayport, N.Y. 11705. El programa funciona en ordenadores IBM PC y compatibles, y viene acompañado de un completo manual. Pensando en aquellos programadores relativamente avanzados que prefieran escribir su propia versión de la Evolución Simulada, describiré aquí BIOS, que es el nombre que he dado a una versión simplificada del programa.

Un microbio de BIOS se representa por un cuadradito de tres píxeles de lado. Podemos ilustrar las seis direcciones en que se mueve tal microbio de acuerdo con la figura 1. Una sencilla tabla especifica el cambio de las coordenadas del píxel central de un microbio en función de la dirección en que el bichito apunta. La tabla contiene dos variables dimensionales de seis elementos, llamadas *desx* y *desy* (desplazamientos según el eje de abscisas y de ordenadas, respectivamente).

Dir	0	1	2	3	4	5
Desx	0	2	2	0	-2	-2
Desy	2	1	-1	-2	-1	1

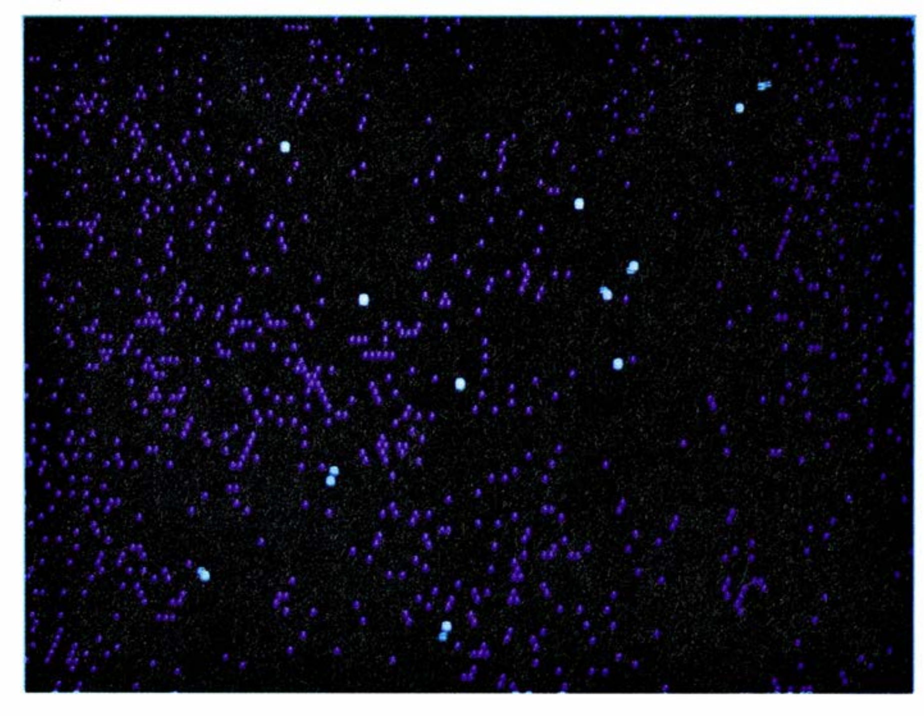
La dirección en que se desplaza un microbio (con respecto a la pantalla del ordenador) viene dada por el valor de la variable *dir*. Los números correspondientes en *desx* y *desy* indican cuántos píxeles en sentido horizontal y vertical, respectivamente, habrá de desplazarse el bichito sobre la pantalla en cada movimiento. Así, por ejemplo, si un microbio tiene la dirección 2, será preciso desplazarle dos píxeles hacia la derecha y uno hacia abajo, dado que $desx(2) = 2$ y que $desy(2) = -1$.

BIOS determina la dirección del movimiento de cada una de las criaturas que tiene a su cargo consultando una fórmula, basada en el código genético de cada microbio, que se halla contenido en una matriz bidimensional llamada *gen*. El elemento $gen(k,j)$ de esa matriz contiene el j-ésimo valor génico del k-ésimo microbio. Cada valor génico figura en la fórmula como exponente de 2, para impedir la aparición de números negativos. La probabilidad de que un microbio se mueva en la dirección d se calcula entonces dividiendo la potencia de 2 que tiene por exponente el valor del gen d entre la suma de las potencias de 2 cuyos exponentes son los valores de los genes. Por ejemplo, la probabilidad de que el microbio gire a continuación fuertemente a la derecha es el resultado de dividir 2^{IT} por la suma $2^{AV} + 2^{D} + 2^{DT} + 2^{AT} + 2^{IT} + 2^{I}$.

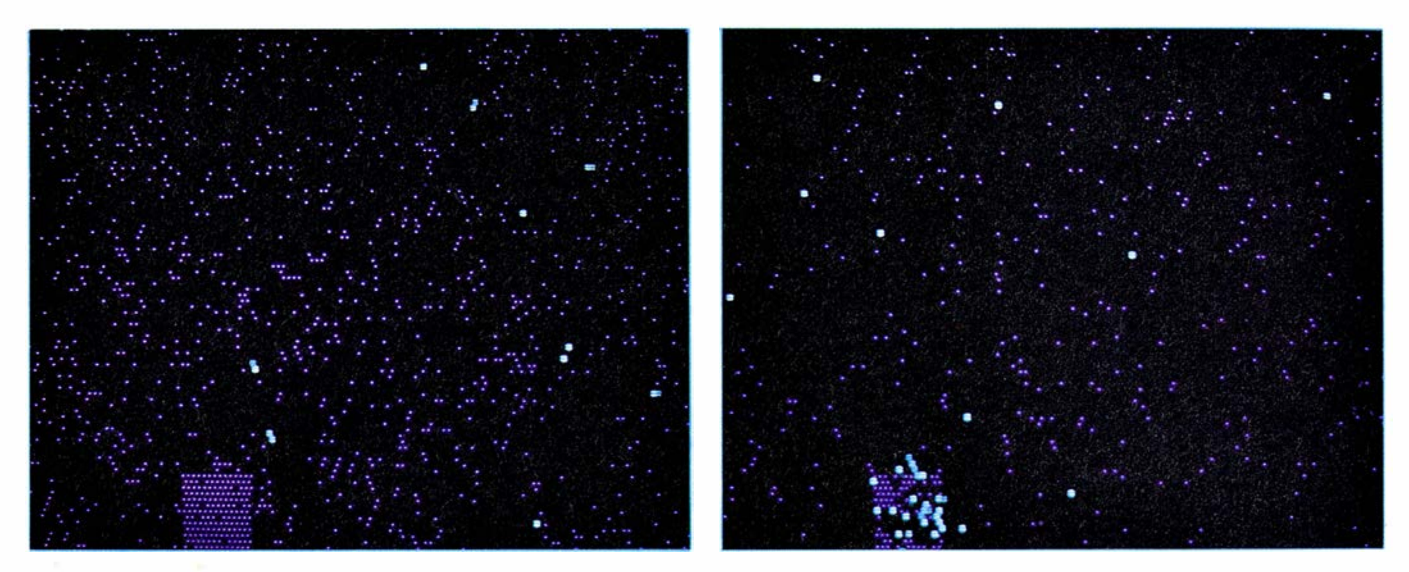
De esta forma, BIOS calcula seis probabilidades para cada uno de los posibles movimientos. Al sumarlas, el resultado es 1, como ha de ser. Podríamos concebir las probabilidades como seis intervalos diferentes, que puestos uno a continuación de otro recubren completamente el intervalo numérico que va de 0 a 1. Dicho de otro modo, si representamos por $p_0,..., p_5$ las probabilidades correspondientes a las seis diferentes direcciones de movimiento, el intervalo 0 cubre desde 0 hasta p_0, el intervalo 1, desde p_0 hasta $p_0 + p_1$, el intervalo 2, desde $p_0 + p_1$ hasta $p_0 + p_1 + p_2$, y así sucesivamente.

BIOS determina entonces, en cada ciclo, un nuevo valor para la dirección de movimiento de un microbio particular; selecciona al azar un número comprendido entre 0 y 1, mira a ver en qué intervalo cae y procede a asignar el número del intervalo a la variable giro. En este esquema, pues, a *AV* le corresponde un valor de giro igual a 0, a *D* le corresponde el valor giro igual a 1, a *DT* el valor 2, 3 a la marcha *AT*rás, 4 a *IT* y 5 a *I*.

Unas cuantas sentencias sencillas completan el algoritmo de movimiento:



2. Los "saltarines" evolucionan lentamente hacia "cruceros"



3. *El Jardín del Edén* (izquierda) *induce la evolución de "viradores"* (derecha)

dir ← *dir* + *giro*(mod 6)
xmicrob(*k*) ← *xmicrob*(*k*) + *desx*(*dir*)
ymicrob(*k*) ← *ymicrob*(*k*) + *desy*(*dir*)

Las tablas *xmicrob*(*k*) y *ymicrob*(*k*) contienen las coordenadas actuales del *k*-ésimo microbio.

En la primera línea se modifica la dirección actual *dir*, sumándole el resultado de la lotería que determina el giro, concretado en la variable *giro*. La adición ha de hacerse módulo 6. Por ejemplo, si *dir* = 5 (lo que significa que el bichito se dirige hacia arriba y hacia la izquierda) y *giro* = 2 (lo que significa que ha de girar del todo a la derecha), el nuevo valor de *dir* será 5 + 2 (mod 6) = 1, y el próximo movimiento del microbio será hacia arriba y a la derecha.

BIOS ha de encargarse del movimiento de todos los microbios de acuerdo con la fórmula anterior, y comprobar a cada paso si alguno de ellos ha chocado contra una barrera o ha atinado en una bacteria. Ha de encargarse, además, de llevar control de la edad y provisión energética de cada microbio, para determinar si un microbio en particular ha de extinguirse o ha de permitírsele que se fisione. Cuando un microbio está presto para fisionarse, el programa se limita a remplazar el viejo por otros dos nuevos, ubicados en la misma posición. Estos heredan los valores génicos del viejo, salvo en lo atinente a uno de ellos, elegido al azar, cuyo valor se incrementa en cierta cantidad en uno de los descendientes y otro valor, también aleatoriamente elegido, en el otro descendiente, que se decrementa en igual monto. Esta descripción de BIOS será suficiente para que algunos lectores prueben mano y traten de redactar el programa.

El entusiasmo por el programa generador de fractales, CRECELENTO, que describí en el número del pasado mes de febrero, no ha ido creciendo lentamente. El voluminoso saco del correo indicaba a las claras cuán persistente es el interés por las fractales de cualquier forma o perfil. Podemos describir científicamente el programa como un simulador de la agregación de difusión limitada, fenómeno que vemos en la formación de ciertos minerales, en el recubrimiento electrolítico de metales e incluso en la acumulación de hollín.

La receta de la construcción de CRECELENTO era de sencillez suficiente como para que muchos lectores pudieran seguirla, y en efecto, muchos lo hicieron. El algoritmo básico consistía en la inyección de una "partícula" que describe un paseo aleatorio por el interior de un círculo, partiendo de un punto de la circunferencia. Cuando la partícula entra en contacto con una compañera estacionaria, deja también de moverse, produciendo así una agregación de partículas. El programa no era difícil de escribir, pero a algunas personas sí les resultó un tanto penoso de observar. ¿Por qué habrían de perder su tiempo viendo como un punto luminoso se pasaba la vida saltando de acá para allá, tardando una eternidad en llegar a nada? En consecuencia, diversos lectores imaginaron cambios en el algoritmo que acelerasen su ejecución.

Edward H. Kidera, de Columbia, logró acelerarlo decididamente partiendo de un círculo pequeño y aumentando sin cesar el radio conforme crecía la agregación. Asimismo, cierto número de lectores hicieron sugerencias destinadas a acelerar el ensayo de contacto con una multitud de partículas compañeras. Tal ensayo suponía comparar los píxeles inmediatos a la partícula con las posiciones, ya registradas, de cada partícula en la multitud en crecimiento.

Ronald C. Read, de la Universidad de Waterloo, en Ontario, hizo sobre esta misma cuestión la sugerencia siguiente. "Quienes utilizan BASIC (como estoy seguro que hacen muchos de sus lectores) disponen de un método mucho más sencillo. Consiste en utilizar la instrucción POINT del BASIC para decidir si al píxel en cuestión se le ha asignado algún color. Se estará entonces empleando la pantalla como dispositivo de almacenamiento."

El más impaciente de todos fue William H. Pratt. Después de todo, ¿para qué hacer que la partícula vagabundee aleatoriamente? ¿Por qué no darle, sin más, una posición aleatoria vecina a la del propio punto de crecimiento? Pratt vio con desazón, sin embargo, que su crecimiento no se parecía en nada a las ilustraciones de febrero pasado. Desde luego, estaba mellado por los bordes, pero era mucho más macizo; una criatura totalmente diferente.

Sin saberlo, Pratt estaba jugando con lo que se conoce por "modelo de crecimiento de Richardson", que es uno de los instrumentos de investigación favoritos de un grupo de matemáticos que han sido apodados como "la mafia de las partículas." Estos investigadores, algunos de los cuales tienen su base en la Universidad de Wisconsin en Ma-

dison, han venido estudiando múltiples modelos de acreción durante más de un decenio. Confío en poder dar cuenta de una reciente visita a Madison en un futuro artículo de esta sección.

El tema de marzo fueron los rompecabezas gentilicios, problemas lógicos que sólo es posible resolver pensando en lo que están pensando otras personas. Una clase entera de tales problemas quedaba representada por tres filósofos que habían echado una siesta a la sombra de un árbol. Al despertar, cada uno de los filósofos se dio cuenta de que las frentes de los otros habían sido "ornadas" por un pájaro. Mas en el curso de las risas consiguientes, el más perspicaz de ellos se dio cuenta de que también su frente había sido ornada. ¿Cómo efectuó la deducción?

A diferencia de James D. Klein, no caí en la cuenta de que hay un caso especial de rompecabezas con dos filósofos. Klein puso a prueba a sus propios hijos con el cuento de dos obreros que se caían de un andamio. La caída no les lastimó, pero sí le ensució la cara a uno de ellos. ¿Por qué salió corriendo a lavarse la cara el operario de la cara limpia, mientras que el de la cara sucia volvía al trabajo sin mayor dilación? Klein escribe "Es muy interesante oírles pensar en voz alta y observar su mirada al hacerse la luz y descubrir la solución".

Otro de los problemas gentilicios fue tomado del libro, de Dennis Shasha, *Las intrigantes aventuras del Dr. Ecco* [Editorial Labor, 1989]. En él, dos generales decimonónicos, cuyos ejércitos se hallan separados por una franja de terreno montuoso, deciden coordinar sus ataques sobre el enemigo enviándose mensajes mediante palomas. Pero, ¿qué mensaje enviar? Si el primer general envía el mensaje "Ataque al amanecer", deberá esperar un mensaje de respuesta del segundo general que confirme la recepción del suyo. ¿Y si alguna de las palomas no consigue llegar a su destinatario? Y aun cuando ambas palomas lleguen a su destino, ¿cómo sabrá el segundo general que su confirmación ha sido recibida? Parece inevitable que habrá de producirse un intercambio infinito de mensajes entre ambos generales.

El atolladero en que se encontraban los generales le recordó a Warner Clements, de Beverly Hills en California, una obrita teatral casi olvidada, uno de cuyos personajes era un aspirante a agente doble que se pasaba el tiempo yendo y viniendo entre dos naciones hostiles. La broma comienza cuando el agente se entera de que el país *A* ha descifrado la clave militar secreta del país *B*. El agente se dirige a *B* pensando en venderles tal información a los servicios de inteligencia de este país. "Eso ya lo sabíamos", le dicen los de *B*. El agente queda un tanto chasqueado, pero entonces se da cuenta de que puede vender esa información a la inteligencia del país *A*. Estos, a su vez, replican: "Estamos informados de que en *B* han descifrado nuestro código. ¡Les hemos estado pasando información falsa!". El agente vuelve corriendo al país *B*. "¿Se han dado cuenta ustedes de que el otro bando sabe que han descifrado su código?"."Claro que sí", le responden. El agente retorna a *A* para darles cuenta de la situación, y así sucesivamente. ¿Cuántas veces podría tener que continuar yendo y viniendo el tal agente, portador de un mensaje cada vez más largo acerca de lo que el otro bando sabe? Aunque en este problema las dos facciones militares no buscan la coordinación, sino que están compitiendo, no por ello resulta más fácil la solución, pues no hay ninguna.

En otros problemas menos fantásticos intervienen personas reales en situaciones de la vida cotidiana, como en los estudiados por Erving Goffman, un sociólogo ya fallecido. Solicité ejemplos y recibí algunos, entre ellos, uno de P. M. Cambeen, de Muiden en Holanda. Durante la segunda guerra mundial, un oficial alemán de las fuerzas de ocupación le manifestaba a uno de los nativos su desconcierto ante las actitudes del pueblo holandés. Le respondió: "Los holandeses tienen tres virtudes. Son inteligentes, leales y pro-nazis. No obstante, cada holandés, individualmente, sólo posee dos de estas virtudes y la opuesta de la tercera". Mientras el oficial faltaba de desarrollar las consecuencias lógicas de este enunciado, el avispado tuvo tiempo suficiente para escabullirse.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

EL RELOJERO CIEGO. Richard Dawkins. Editorial Labor, Barcelona 1988.

LAS INTRIGANTES AVENTURAS DEL DR. ECCO. Dennis Shasha. Editorial Labor, Barcelona 1989.

ARTIFICIAL LIFE: THE PROCEEDINGS OF AN INTERDISCIPLINARY WORKSHOP ON THE SYNTHESIS AND SIMULATION OF LIVING SYSTEMS HELD SEPTEMBER, 1987, IN LOS ALAMOS, NEW MEXICO. Editado por Christopher G. Langton. Addison-Wesley Publishing Company, Inc., 1989.

Libros

Espacios de Hilbert, antropología, estadística y filosofía de la ciencia

E. Elizalde, L. Alonso, P. Sánchez y A. Llano

ESPACIOS DE HILBERT, por Lorenzo Abellanas y Alberto Galindo. Eudema Universidad; Madrid, 1988.

En los ambientes universitarios de nuestro país se ha venido echando siempre en falta un buen texto sobre la cuestión que cubriese las necesidades específicas de las enseñanzas de la física matemática, disciplina harto compleja de desarrollar en sus diversos niveles, como todas las que están a caballo entre dos ramas distintas de la ciencia. Si bien han ido circulando apuntes, más o menos logrados, intentando cubrir tal objetivo, no es en absoluto una alabanza inmerecida el afirmar que, por fin, estos *Espacios de Hilbert* constituyen un firme candidato a rellenar el hueco de modo definitivo.

Ello no es tarea fácil. Suele ocurrir, en efecto, que los textos escritos por matemáticos acostumbren a perder de vista, ya sea por desidia o por simple desconocimiento, las necesidades específicas de la física teórica. Y es frecuente también, por otra parte, que los libros sobre métodos matemáticos escritos por físicos adolezcan en general de una carencia de precisión y de profundidad matemática (fruto de un conocimiento insuficiente de los temas), que hace que estos textos aparezcan sólo de manera tímida como meros apuntes, conscientes los autores de su escasa autoridad en la materia.

No es éste el caso del texto que nos ocupa. Sus autores son dos máximos especialistas en el tema, catedráticos competentes del único Departamento de Métodos Matemáticos de la Física que existe en España. Es más, Abellanas y Galindo han publicado contribuciones personales sobre diversos aspectos de los espacios de Hilbert en revistas internacionales especializadas. Ello es, de entrada, toda una garantía, a la vez que una manifestación de que son probablemente las personas más idóneas para haber abordado (como han hecho) el problema de la falta de un texto sobre los espacios de Hilbert que antes apuntaba.

El libro consta de 14 capítulos más uno dedicado a apéndices. El primero trata de espacios vectoriales y de aplicaciones lineales en general. Se introducen en él, entre otros, los conceptos de base infinita, suma directa de subespacios, aplicación antilineal, gráfico de un operador lineal, isomorfismo y proyector. El capítulo 2 se dedica a una exposición de los espacios vectoriales normados. Después de la definición y de considerar varios ejemplos, se aclara la relación entre norma y distancia. Se introducen las sucesiones convergentes en espacios normados y el teorema de completación, o compleción, como prefieren los autores, los cuales, dicho sea de paso, han querido imponer su propio criterio en este y en algunos otros términos matemáticos. Abordan el concepto de suma infinita de espacios normados y deducen en un apéndice las desigualdades de Minkowski y de Hölder (para sumas).

El tercero de los temas está dedicado a los espacios *Lp*. Tratan en él sobre borelianos y funciones borelianas, introducen la integral de Lebesgue en una dimensión y, a continuación, los espacios *L1* y *Lp*, en general, para recopilar luego en otra sección los teoremas fundamentales sobre la integral de Lebesgue, la cual comparan con la integral de Riemann unidimensional. Después de generalizar la integral a n dimensiones, estudian el teorema de Fubini y el de derivación bajo el signo integral, para terminar en un apéndice con las desigualdades integrales de Hölder y de Minkowski. La integral de Lebesgue se introduce de un modo mucho más rápido que el que suele ser habitual en teoría de la medida.

Con el tema 4 entramos en los espacios de Hilbert. Se presenta su geometría, para pasar en el tema 5 a definir las bases de Hilbert y el concepto de separabilidad. Se detallan las bases ortonormales de funciones más importantes, con los correspondientes pesos asociados. El 6 se ocupa de cuestiones generales sobre operaciones lineales acotados en espacios de Hilbert: dominio de dichos operadores y existencia de inverso. Se consideran también algunos operadores interesantes. El tema 7 trata de la dualidad y en el 8 se introducen los operadores autoadjuntos (acotados y positivos), los proyectos ortogonales y los operadores unitarios, así como la transformación de Fourier como operador unitario sobre *L2*, para terminar con los operadores normales, en general.

A otra familia de gran interés, los operadores compactos, se dedica el capítulo 9. Después de una introducción general se estudian los operadores de la clase Hilbert-Schmidt y los operadores de clase de traza. Se hace hincapié en los ejemplos de operadores de clase de traza en mecánica cuántica.

Los capítulos 10, 11 y 12 presentan las nociones básicas de espectro y resolvente, sus propiedades generales y la estructura específica del espectro de las familias antes mencionadas: de operadores normales, unitarios, isométricos, autoadjuntos y de proyección. En particular, el espectro de los operadores compactos, su forma canónica y su triangularización se detallan en un capítulo propio, el 12.

En el capítulo 13 se analiza la teoría de las ecuaciones integrales, en aplicación inmediata de los resultados obtenidos en los capítulos 9 a 12. Como procedimientos prácticos de resolución de ecuaciones integrales se consideran el método iterativo (series de Neumann) y de los determinantes de Fredholm; se estudian las ecuaciones integrales de Volterra y las ecuaciones integrales con núcleo simétrico.

El capítulo 14 contiene el cálculo funcional para operadores autoadjuntos (más generalmente normales) acotados, en sus versiones continua y boreliana, así como la descomposición espectral y nociones con ella relacionadas. Finalmente, en el capítulo de apéndices se resumen las propiedades más destacables de las matrices finitas: los conceptos de traza, determinante, rango, producto directo de matrices, el espectro de las matrices en $Mn(R)$, teoremas sobre la localización en el plano complejo de los valores propios, el teorema de Cayley-Hamilton y el teorema espectral, terminando con nociones de cálculo funcional sobre matrices finitas.

Además de por la concisión y claridad del texto, sumada a la importancia de los temas tratados, destaca el libro por la cantidad y calidad de los ejemplos intercalados en los diversos apartados de los capítulos y los ejercicios del final de los mismos, a los cuales acompañan sus correspondientes soluciones. Incluye los operadores que con

mayor frecuencia aparecen en las aplicaciones prácticas: la transformación de Fourier, las matrices densidad, el operador posición (acotado), los operadores integrales, etcétera. (E. E.)

VICTORIAN ANTHROPOLOGY, por George W. Stocking, Jr. The Free Press; Collier Macmillan Publishers; Londres, 1987.

"Antropología" es una voz pródiga. Si atendemos a la diversidad de disciplinas que buscan en ella amparo, podríamos crear una nueva carrera universitaria. Así, a vuela pluma, me viene a la memoria la antropología "física", "biológica", "médica", "metafísica", "cultural", "social", "industrial"; con sus compuestos y variantes: "paleoantropología", "antropología de los pueblos primitivos", etcétera. Si el lector es curioso y se cuela en las aulas donde se enseña cada una, es probable que termine tan socrático como entró: sólo sabrá que no sabe nada. Le introducirán, en la "filosófica" o "metafísica", en las cuatro famosas preguntas de Kant: ¿qué puedo saber?, ¿qué debo hacer?, ¿qué puedo esperar?, ¿qué es el hombre? "A la primera cuestión, expone el de Koenisberg, responde la metafísica, a la segunda la moral, a la tercera la religión y a la cuarta la antropología. Pero en el fondo se podría poner todo esto en la cuenta de la antropología, porque las tres primeras cuestiones se refieren a la última."

Ahora bien, antes de entrar en más aulas, para sacar mayor partido, quizá convendría que leyese *Victorian Anthropology* de George W. Stocking, segunda gran obra de este director del centro Morris Fishbein de historia de la ciencia y la medicina de la Universidad de Chicago. La primera, hoy clásica, lleva por título *Race, Culture, and Evolution: Essays in the History of Antrhopology* (Nueva York, 1968). Empezó a escribir aquélla casi el día siguiente de haber salido ésta de las prensas, nos cuenta en el prólogo. Tiene, pues, el valor de la obra madura, repensada y sin cabos sueltos. Ha podado la vehemencia, el juicio precipitado y el prejuicio. Es una suerte de filosofía de la historia de la antropología, cuyas apreciaciones, se compartan o no, merecen el respeto de quien no escribe a humo de pajas, ni se deja llevar por el radicalismo de muchos de los protagonistas. Tan riguroso es en el tema acotado que evita la dispersión del lector con la evolución de la antropología en el continente (salvo en el capítulo introductorio) y América del Norte.

Las ideas que se debaten movían a la polémica en un momento de plena exaltación y confianza en la fuerza creadora del hombre, que el autor compendia en la Exposición Universal de Londres de 1851. La máquina suponía el hiato con la civilización inmóvil del campo. Porque era perfectible e implicaba avance y desarrollo: evolución. Era, además, fruto de la ciencia, cualidad del hombre occidental. Si el hombre puede evolucionar en su saber, ¿lo hará también en otros terrenos, como la moral y la religión, en sus instituciones, sus costumbres? ¿Y la sociedad?

El capítulo introductorio o primero expone la idea de "cultura" y "civilización" en Alemania y Francia, con la reseña de la indomanía que despierta en la primera la filología comparada y el positivismo que empieza a emerger en la segunda. Inglaterra aporta entonces su peculiaridad con el círculo de los anglicanos liberales de Cambridge y, sobre todo, la filosofía utilitarista de John Stuart Mill. Se trata, en todo caso, de una afirmación de la evolución que nada tiene que ver con la biología, fenómeno estudiado con profundidad por Peter Bowler, sobre todo en un libro que Stocking no cita, quizá porque el suyo estaba ya en galeradas (*Theories of Human Evolution*, 1986).

Comienza el capítulo segundo recordando que las tribus sin civilizar del mundo apenas si estaban representadas en la Magna Exposición. Hubo más tarde la venta del Palacio de Cristal a los especuladores privados en 1852. Se crearon entonces salas con grupos de esquimales, "pieles rojas", negros, bosquímanos, papúes, malayos, aborígenes australianos, etcétera. Se configuraba la etnología. Ese cuadro y el escrito de Prichard sobre la historia física de la humanidad dan pie para una discusión extensa sobre el monogenismo y el poligenismo, cuestiones que se amplían en el capítulo tercero con las notas de viaje de distintos exploradores. De fondo, siempre, el carácter evolutivo o no de los primitivos.

El nacimiento de la antropología social se certifica con su análisis de la teoría del derecho en Maine y, por encima de todo, en la *Social Statics* de Spencer, cuya propia evolución alcanza en este libro una interpretación ajustada. El autor hace tributaria esa corriente del cauce darwinista en el capítulo sexto. Nacidas de esa nueva fuente son John Lubbock, E. B. Tylor y John McLennan, que ensancharán los motivos de comparación en el tiempo y el espacio: la religión, la moral sexual, el matrimonio, la función de la mujer. Complementario del estudio de las ideas y de sus propugnadores es el apartado dedicado a las instituciones y el estatuto científico por el que disputaron. Dedica el postrer capítulo a reflexionar sobre el alcance de la antropología victoriana, una glosa sobre su devenir (hasta 1980) y su valor reduplicativamente antropológico.

¿Y España? Justo es reconocer que, en la consideración de la naturaleza de los pueblos primitivos o de otras culturas, algo podemos enseñar con nuestra historia americana. Cuando arranca la lección aquí impartida ya se habían independizado de la corona borbónica muchos países. El derecho de gentes, la experiencia jesuítica del Paraguay..., son realidades que la leyenda negra celó o sólo reconocidas cuando los anglosajones nos han de vender sus obras, como en el "prefacio a la edición española" de la *Antropología* de Tylor, uno de los autores nucleares del libro de Stocking.

Los problemas de la antropología del siglo XIX no nos fueron ajenos. Bebíamos, con preferencia, de las obras francesas; gozaron de amplia difusión los escritos de A. de Quatrefages, en particular *L'espèce humaine*. Con ese enfoque enjuicia José Canalejas en 1863 la "Exposición universal de Lóndres".

En 1865 se creaba en Madrid la Sociedad Antropológica Española, que se propuso investigar seis puntos netamente –y utópicamente– "actuales": "clasificación de las razas y variedades de la especie humana, y discusión sobre su origen; examinar los resultados del cruzamiento de las razas y variedades de la especie humana; fijar, hasta donde sea posible, si los adelantamientos de la civilización influyen ventajosamente o desventajosamente en las condiciones físicas, morales e intelectuales del hombre; progresos de la libertad individual en la literatura y en el arte modernos; razas aborígenes de la Península española y de las islas Baleares y Canarias, y su cruzamiento con todas las demás que las han poblado hasta nuestros días; estudio físico-químico del hombre". Si algún esforzado se decidiera a estudiar ese capítulo interesante de nuestra ciencia –sin limitarse a la obra de González de Velasco– no debiera dejar de leer el libro de Stocking; el método, la agudeza de la interpretación, el conocimiento exhaustivo y el distanciamiento necesario le servirán de muchísimo. (L.A.)

PARAMETER ESTIMATION AND HYPOTHESIS TESTING IN LINEAR MODELS, por K. R. Koch. Springer-Verlag; Berlín, 1988.

Se trata de una excelente obra, muy bien estructurada, que viene, si no a

llenar un vacío, sí a presentar de forma consolidada unos conocimientos que requiere todo profesor de estadística de nivel superior. El objetivo es el de presentar los métodos multidimensionales de estimación de parámetros, contraste de hipótesis y estimación de intervalos de confianza en una lógica integrada, incluyendo asimismo vectores y álgebra de matrices, así como teoría de la probabilidad. Como tónica general de la obra en sus cinco grandes capítulos, importa más la comprensión de los temas expuestos que la presentación de definiciones y teoremas.

El texto se inicia con una detallada exposición de los métodos del álgebra lineal en que se basará la inferencia estadística de parámetros. Incorpora aspectos no frecuentemente tratados en obras similares, como las inversas generalizadas, que permitirán resolver sin demasiadas complicaciones el problema de la estimación de parámetros, cuando la matriz de diseño no es de rango máximo, o las proyecciones, que hacen factible una interpretación geométrica de dicha estimación.

La teoría de la probabilidad, que regula el tratamiento de los sucesos aleatorios que resultan de medidas o experimentos, nos conduce al estudio de qué ocurre y por qué leyes se rige lo que son resultados inciertos. Valoramos especialmente la inclusión de las distribuciones normal univariante y multivariante, así como las univariantes beta y gamma y las derivadas X^2, *F*, *t* y *Wishart*, que se requerirán para la prueba de hipótesis y estimación de intervalos de confianza.

El tercer gran capítulo se dedica a la estimación de parámetros en modelos lineales. Sobre la base de que corresponde esencialmente a la estimación de valores esperados de las observaciones, destacamos que se dedique un apartado a los modelos lineales generalizados, de especial interés en un tratado sistemático del tema de estimación de parámetros.

Aborda el contraste de hipótesis, la estimación de intervalos de confianza y la prueba de "outliers" en el modelo de Gauss-Markoff. Primero se presentan las pruebas de hipótesis, puesto que las propiedades óptimas de éstas pueden transferirse a la estimación de intervalos. Un importante problema que aquí se resuelve es el de la eliminación, bajo una probabilidad de error dada, de observaciones altamente falseadas, las cuales contienen los también denominados "outliers". Se podría objetar que el contraste de hipótesis, la estimación de intervalos de confianza y las pruebas de "outliers" se restringen aquí al modelo de Gauss-Markoff, pero éstos son precisamente los de más alta aplicabilidad.

Por último, se incluye un capítulo sobre análisis discriminante, partiendo de la suposición de que se han observado una o más características de un fenómeno durante un experimento; sin embargo, al tratarse las observaciones de muestras de distintas poblaciones o clases, debe decidirse a cuál pertenecen.

Nos reiteramos en la consideración global de este texto como una gran obra, perfectamente expuesta. Nos hubiera gustado que se hubieran incorporado algunos capítulos sobre sistemática de los distintos diseños de experimentos y otro sobre comparaciones múltiples, así como notas complementarias y ejercicios. El capítulo de análisis de la covarianza, excesivamente condensado, merecería un desarrollo más amplio. Finalmente, las referencias reseñadas –que sentimos no estén distribuidas por capítulos– obedecen a un criterio de exhaustividad y se aúnan las clásicas y las actuales. (P. S.)

FILOSOFÍA DE LA CIENCIA EXPERIMENTAL, por Mariano Artigas. Ediciones Universidad de Navarra; Pamplona, 1989.

La filosofía de la ciencia tiene un interés cada vez mayor no sólo en el ámbito filosófico, en el que se cultiva como una disciplina especializada que está en auge, sino también en el científico. Se advierte en la actualidad que una comprensión adecuada de los métodos y resultados de las ciencias sólo es posible si se dispone de análisis filosóficos rigurosos. A pesar de que existe abundante bibliografía acerca de esta temática, no es fácil encontrar obras en las que el rigor filosófico vaya unido a un buen conocimiento de las ciencias.

La obra de Mariano Artigas, doctor en ciencias físicas y en filosofía, tiene gran interés para el lector. Su esquema es claro, sus argumentaciones son pausadas y rigurosas, y abundan los ejemplos concretos tomados de las diferentes disciplinas científicas. Está dividida en 8 capítulos, que se distribuyen en 4 dedicados al análisis de los objetivos, métodos y construcciones de la ciencia experimental, y otros 4 en los que se estudia la objetividad, la verdad, el progreso de la ciencia y sus relaciones con la filosofía. Resulta un acierto esta división, porque permite abordar los problemas filosóficos después de haber analizado cuidadosamente los aspectos principales de la ciencia.

En cuanto al método, el autor atribuye gran importancia a la construcción del objeto de las teorías y analiza sus características. Desarrolla y aplica ideas que han sido formuladas por Evandro Agazzi y que encuentran gran eco en la epistemología actual. En ese análisis pone de relieve los elementos convencionales que hacen posible la objetividad, y afirma que se alcanza un conocimiento verdadero que, simultáneamente, es parcial y perfectible. De este modo se evitan los inconvenientes que se encuentran en las posiciones instrumentalistas, en las que la ciencia queda reducida a una herramienta útil para formular predicciones, y en las conjeturalistas, donde se afirma que, si bien la verdad es el ideal que guía la investigación, las construcciones concretas son hipótesis cuya verdad nunca podría afirmarse con seguridad.

El conjeturalismo suele ir unido al modelo hipotético-deductivo y a la presunta imposibilidad de verificar las hipótesis. Artigas muestra de modo convincente que, no obstante las razones lógicas que se oponen al verificacionismo, es posible formular criterios que permitan establecer con suficiente certeza las leyes y teorías. Estos criterios cobran todo su sentido cuando, de acuerdo con el análisis de la objetividad, se advierte que la verdad científica tiene un carácter contextual y que la demostrabilidad contextual garantiza de modo automático la validez referencial y pragmática de las construcciones.

El esclarecimiento de los problemas referentes a la objetividad y a la verdad permite al autor señalar cómo se pueden afrontar las discusiones actuales acerca del progreso, la comparación entre teorías, la racionalidad y la fiabilidad.

El autor señala acertadamente que nos encontramos en un momento clave para la filosofía de la ciencia. El nacimiento y desarrollo de la ciencia clásica desde el siglo XVII fue acompañado por polémicas que impidieron captar adecuadamente su valor real, y además faltaba una perspectiva amplia que sólo se dio cuando surgieron nuevas ramas y disciplinas. En las primeras décadas de nuestro siglo existía ya una variedad de disciplinas y teorías que proporcionaba base suficiente para la reflexión filosófica, pero entonces se desarrolló una epistemología excesivamente mediatizada por la perspectiva positivista. En la actualidad se cuenta con elementos de tipo lógico, histórico y sociológico que permiten, por vez primera en la historia, conseguir una comprensión objetiva de la ciencia que tiene gran interés tanto para la misma ciencia como para su integración armónica en la totalidad de la vida humana. (A. L.)

Apuntes

No saber que los electrones son menores que los átomos, que los continentes están en movimiento o que el oxígeno que respiramos procede de las plantas, son muestras palmarias de analfabetismo en la ciencia. Nueve de cada diez británicos y norteamericanos se inscriben en esa categoría. No mejoramos nosotros la cifra, agravada aquí con la tendencia creciente a convertirse los profesionales de la ciencia en analfabetos de la lengua.

La cinética química, que venía registrando un notable avance en el conocimiento de la disociación de las moléculas tras la absorción de un fotón de radiación, podría haber encontrado la articulación necesaria con el desarrollo del método de la espectroscopía Doppler alineada con la velocidad: el método VADS. Técnica que ha empezado a dar sus frutos en las distribuciones de estado, anisotropías de dispersión y energías de disociación de enlace.

Llámanse histerantas las plantas que echan las hojas después de las flores, como el cólquico o el azafrán. Preciada entre todas es la *rosa del azafrán*, formada por seis piezas de figura elíptica, que nacen del bulbo y desarrollan un largo tubo de unos tres milímetros de diámetro. Por dentro del tubo pasa el estilo, largo filamento blanco cuyo ápice amarillento se divide en tres hebras rojas, las *briznas* o los *clavos* del azafrán. Desde hace 3500 años, por lo menos, se vienen explotando sus propiedades olorosas, colorantes y medicinales. Pero en ese lapso de tiempo no se había conseguido mejorar los métodos de plantación y recogida anual, que encarecen el ya subido valor de la especia; sépase que una flor produce unos 5 miligramos en peso seco y una hectárea viene a rendir unos 15 kilogramos. Investigadores israelíes han diseñado un régimen controlado de temperatura que promueve la histerantia y facilita la recolección mecánica.

Es una vieja idea la de que los materiales de la vida llegaron a lomos de cometas y asteroides que bombardearon la superficie de los planetas terrestres. Más reciente es la hipótesis de que podrían haberse llevado buenas franjas de su atmósfera. Y nuevo del todo el desarrollo de esa posibilidad. Marte, en particular, podría haber tenido una atmósfera con una presión de superficie muy parecida a la que tiene hoy la Tierra; sugiérese incluso que el colapso de la atmósfera marciana dependió de los impactos sufridos más que de la actividad volcánica.

Hablando de atmósferas, la reciente ocultación de una estrella de duodécima magnitud por Plutón nos ha traído una ocasión pintiparada para el estudio de la de este planeta. Las mediciones espectroscópicas nos hablan de su abundancia en metano, aunque no pueden calibrar su cuantía. El examen del equilibrio energético de la atmósfera, al dar la temperatura, permite acotar también su peso molecular medio e inferir que existe otra molécula más pesada que el metano. La duda está en cuál de estas tres: argón, monóxido de carbono y nitrógeno molecular.

El desarrollo del plano corporal del embrión de *Drosophila* depende de la actividad de ciertos determinantes maternos que se encuentran en la parte anterior y posterior del huevo. En un breve intervalo de dos años (1986–88) se ha descifrado la naturaleza y forma de acción de los determinantes anteriores. Empieza ya a conocerse los determinantes posteriores. Se supone que son siete los genes implicados. El método de descubrimiento se ha fundado en provocar una mutación en los mismos cuyo resultado causa la ausencia de segmentos abdominales en el insecto.

De la mayoría de las aberraciones atribuidas a la ciencia, ésta no tiene la responsabilidad, sino el legislador. Es el caso del aborto y esterilización de los deficientes. En un reciente estudio encargado por la Asociación Médica Británica se rechaza, por atentar contra la dignidad humana, cualquier normativa que prohíba el matrimonio entre sidosos, así como el aborto o esterilización de las mujeres portadoras del virus.

El ruido se halla por doquier en cualquier sistema físico que abordemos. ¿Es siempre molesto? Lo era hasta que se convirtió en objeto de atención propia. Constituye hoy un aspecto del caos en los sistemas dinámicos y una característica del principio de incertidumbre y del indeterminismo de los sistemas cuánticos. Además, conocerlo implica empezar a dominarlo. Así, en los láseres anulares se acaba de demostrar que, con una asimetría periódicamente modulada entre las ondas que avanzan en el sentido de las agujas del reloj y las ondas antihorarias, la razón de señal de ruido en la salida aumenta poderosamente cuando se inyecta más ruido en el sistema.